

PROJETO DE GRADUAÇÃO

ANÁLISE DE UM SISTEMA DE MITIGAÇÃO DE CATENÁRIA EM LINHA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA BASEADO EM LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Por,
Neil Martins da Silva

Brasília, 11 de Julho de 2012

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**ANÁLISE DE UM SISTEMA DE MITIGAÇÃO DE
CATENÁRIA EM LINHA DE TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA BASEADO EM LIGAS
COM MEMÓRIA DE FORMA**

POR,

Neil Martins da Silva

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Edson Paulo da Silva, UnB/ ENM (Orientador)

Prof.^a Dianne Magalhães Viana, UnB/ ENM

Prof.^a Aida Fadel, UnB/ ENM

Brasília, 11 de Julho de 2012.

Agradecimentos

Eu agradeço principalmente aos meus pais Maria Ivonete Martins de Oliveira e Adelson Oliveira da Silva pelo esforço, dedicação e companheirismo na minha formação como pessoa. À minha namorada Laianne Barros de Alcântara por estar sempre ao meu lado dividindo tanto a angústia das provas quanto a alegria das comemorações. Ao meu padrinho e grande amigo Osvaldo Soares de Oliveira Junior por me orientado e cativado desde sempre. Aos meus amigos que muito me ajudaram a crescer, em especial André Albuquerque Thomas e Brandão. Aos meus orientadores Edson Paulo da Silva e Dianne Magalhães Viana, que muito me ensinaram durante toda a realização desse trabalho. E ao meu cachorro Maylow por ter passado todos esses anos ao meu lado.

Neil Martins da Silva

RESUMO

As ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys - SMA*) são uma família de ligas metálicas que exibem basicamente dois comportamentos excepcionais: pseudoelasticidade e efeito de memória de forma. Isso quer dizer que esses materiais podem sofrer uma deformação através de um carregamento mecânico e retornar para suas formas originais com o descarregamento e um aquecimento respectivamente. Tais comportamentos possibilitam o emprego desses materiais no desenvolvimento de aplicações nas mais diversas áreas. O presente projeto se insere no contexto de aplicação de SMA em linhas de transmissão de energia elétrica, que em função de aumento de temperatura podem sofrer, em determinadas situações, flechas excessivas que por questões de segurança devem ser reduzidas a níveis pré-estabelecidos. No Brasil, em função do sobrecarregamento de muitas linhas, a ocorrência de flechas excessivas tem se intensificado. O objetivo do presente projeto é analisar um dispositivo baseado no comportamento termomecânico das SMA que seja capaz de retrair cabos condutores de forma passiva em função do aumento de temperatura dos mesmos. Do ponto de vista metodológico, o projeto parte da análise de uma solução já desenvolvida fazendo-se uso de um modelo matemático para SMA. Os resultados ilustram as potencialidades das SMA para este tipo de aplicação bem como da solução já disponível na literatura. A partir desses resultados buscar-se-á conceber uma solução com melhor desempenho.

ABSTRACT

Shape Memory Alloys - SMA are a family of metal alloys that have basically two kinds of behaviors: pseudoelasticity and shape memory effect. This means that these materials can undergo deformation by a mechanical load and return to their original forms with the unloading and warming. Such behaviors allow the use of these materials in the development of applications for many different purposes. This project analyses the use of the shape memory alloys in the development of a device to mitigate the thermal sag in the power transmission cables. In Brazil, due to the overloading of many lines, the occurrence of excessive sag has intensified. The goal of this project is to analyze a device based on the thermomechanical behavior of SMA that is capable to retract passively due to the increase of his temperature. The project starts from the analysis of a solution developed by making use of a mathematical model for SMA. The results illustrate the potential of SMA for this type of application as well as the solution already available in the literature. These results are expected to allow the design of a better performance performing solution.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO.....	10
1.2 OBJETIVOS.....	11
1.3 METODOLOGIA.....	11
1.4 DESCRIÇÃO DO RELATÓRIO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DAS LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA.....	12
2.1.1 TRANSFORMAÇÃO DE FASE MATENSÍTICA TERMOELÁSTICA	13
2.1.2 QUASIPLASTICIDADE	14
2.1.3 EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA.....	15
2.1.4 PSEUDOELASTICIDADE	16
2.2 ASPECTOS NORMATIVOS DO PROJETO.....	17
2.2.1 MÉTODO CONVENCIONAL	17
2.2.2 MÉTODO DE CÁLCULO ALTERNATIVO	18
2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CABOS CONDUTORES.....	19
2.3.1 REPRESENTAÇÕES MATEMÁTICAS DA POSIÇÃO DO CABO.....	20
2.3.2 CÁLCULO DA FLECHA	22
2.3.3 CÁLCULO DO COMPRIMENTO DO CABO	22
2.3.4 CÁLCULO DA MUDANÇA DE ESTADO	23
2.4 MODELO DE BRINSON PARA SMA	24
2.4.1 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	26
3 ANÁLISE DO SLIM – <i>Sagging Line Mitigator</i>.....	29
3.1 DESCRIÇÃO DO SLIM.....	30
3.2 ESTUDO DE CASO	31
3.3 MODELAGEM DA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO EFETIVO DO SLIM	36
3.4 ACOPLAMENTO DA VARIAÇÃO DE COMPRIMENTO EFETIVO DO SLIM COM A DEFORMAÇÃO DO SMA	43
3.5 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA FLECHA	44
4 CONCLUSÃO	47
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	48
ANEXOS.....	50

LISTA DE FIGURAS

2.1	Evolução da fração volumétrica de martensita com a temperatura	12
2.2	Movimento coordenado e deformação cisalhante que ocorre na transformação martensítica.....	13
2.3	Modelo de esferas reduzidas que representam as estruturas correspondentes às fases austenítica e martensítica.....	14
2.4	Curva Tensão-Deformação quasiplástica típica	15
2.5	Efeito de Memória de Forma	16
2.6	Curva tensão-deformação pseudoelástica típica	16
2.7	Peso próprio do cabo representado pela função parabólica.....	20
2.8	Peso próprio do cabo representado pela função catenária	20
2.9	Condutor suspenso em dois suportes de mesma altura.....	21
2.10	Curva tensão-deformação ilustrando a pseudoelasticidade e o efeito de memória de forma.....	27
2.11	Curva tensão-deformação para a máxima deformação residual	28
3.1	Aumento da flecha formada devido à variação de temperatura	29
3.2	SLiM - <i>Sagging Line Mitigator</i>	30
3.3	Instalação do SLiM	30
3.4	Contração do atuador, tracionando o cabo condutor.....	31
3.5	Atuador estendido, diminuindo a tração no cabo condutor	31
3.6	Esquema da flecha em um vão de 400m.....	32
3.7	Mecanismo SLiM	34
3.8	Curva Deformação-Temperatura do atuador com memória de forma (ϵ_{SMA})	35
3.9	Vista frontal do SLiM.....	36
3.10	Representação simplificada do SLiM.....	36
3.11	Conjunto de fios de SMA.....	37
3.12	Modelagem do SLiM.....	37
3.13	Configuração aberta do SLiM na condição fria	38
3.14	Configuração fechada do SLiM na condição quente	39
3.15	Representação da variação de comprimento do SLiM devido à variação de θ no segundo quadrante	39
3.16	Representação da variação de θ no segundo quadrante.....	41
3.17	Representação da variação de θ partindo do segundo quadrante e finalizando no primeiro	41
3.18	Representação da variação de comprimento do SLiM devido à variação de θ no primeiro e no segundo quadrante	42
3.19	Deformação de um fio de SMA devido à variação de temperatura	43
3.20	Curva variação do comprimento efetivo do SLiM pela deformação do SMA.....	44
3.21	Curva variação da flecha pelo $\Delta SLiM$	46
3.22	Curva variação da flecha pela temperatura	46

LISTA DE TABELAS

2.1	Características gerais das fases martensita e austenita.....	14
2.2	Distâncias básicas.....	17
2.3	Parâmetros para cálculo de distância de segurança	19
2.4	Propriedades da liga NiTi	27

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

M_S	<i>Martensite start</i> – Temperatura e inicial de formação da martensita	[°C]
M_f	<i>Martensite finish</i> – Temperatura final de formação da martensita	[°C]
A_s	<i>Austenita start</i> – Temperatura inicial de formação da austenita	[°C]
A_f	<i>Austenita finish</i> – Temperatura final de formação da austenita	[°C]
D_A	Módulo de elasticidade da austenita	[N/m ²]
D_M	Módulo de elasticidade da martensita	[N/m ²]
L_F	Comprimento do fio de SMA no estado frio	[m]
L_Q	Comprimento do fio de SMA no estado quente	[m]
D_0	Deformação residual	[mm/mm]
D	Módulo de elasticidade	[N/m ²]
A	Distância básica	[m]
U	Tensão máxima de operação da linha	[kV]
D_U	Valor em metros, numericamente igual à tensão máxima de operação	[m]
V_L	Valor em metros, numericamente igual à tensão máxima de crista	[m]
P_U	Valor de sobretensão de manobra	[kV]
b	Fator de correção para condições atmosféricas diferentes das normais	
n	Coefficiente de segurança	
k	Fator de forma	
a	Vão	[m]
f	Flecha	[m]
h	Altura de segurança	[m]
y	Posição vertical	[m]
x	Posição horizontal	[m]
C	Parâmetro de catenária	[m]
c	Comprimento do braço de alavanca do SLIM	[m]
r	Comprimento dos fios de SMA	[m]
T_o	Componente horizontal da força axial	[N]
p	Peso unitário do cabo	[N/m]
S	Seção do condutor	[mm ²]
T	Temperatura	[°C]
H	Altura de suspensão	[m]

Símbolos Gregos

α	Coefficiente de expansão linear	[1/°C]
α_t	Coefficiente de dilatação térmica	[1/°C]
ξ	Fração volumétrica de martensita	[%]
ξ_T	Fração volumétrica de martensita formada por temperatura	[%]
ξ_S	Fração volumétrica de martensita formada por tensão	[%]
τ	Coefficiente de expansão térmica	[MPa/°C]
θ	Inclinação do braço de alavanca	[rad]
ε_{SMA}	Deformação do fio de SMA	[%]

Sobrescritos

- Variação temporal
- Cr Crítico

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
LT	Linha de Transmissão
EDS	<i>Every Day Stress</i>
SMA	<i>Shape Memory Alloy</i>
SLiM	<i>Sagging Line Mitigator</i>
CCC	Estrutura Cristalina Cúbica de Corpo Centrado

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os aspectos gerais sobre as ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys* - SMA), contexto no qual o presente trabalho se insere, bem como as motivações para o seu desenvolvimento. Os objetivos do trabalho são estabelecidos, assim como a metodologia para alcançá-los. Por fim é apresentada a estrutura básica deste relatório.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

O sistema de energia elétrica pode ser dividido em três segmentos: geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A crescente urbanização e industrialização causam uma maior demanda nas linhas de transmissão de energia elétrica que, com muita frequência, são atendidas por meio de sobrecarregamento das linhas já em operação (Goldemberg & Lucon, 2006).

No Brasil, grande parte do sistema de transmissão de energia elétrica está em operação há mais de três décadas (Monteiro, 2011). Como as linhas de transmissão – LT's são projetadas para um carregamento específico, não é possível aumentar o carregamento das linhas sem algum tipo de consequência indesejável. Um aumento do carregamento na LT resulta numa maior geração de energia térmica devido ao efeito joule. Com esse ganho de energia térmica, os cabos condutores sofrerão dilatação térmica aumentando o seu comprimento. Essa dilatação linear, por sua vez, provoca um aumento das flechas em linhas de transmissão. É cada vez mais comum a ocorrência de trechos de LT's nos quais a flecha atinge valores excessivos que violam a distância condutor/solo mínima especificada (Eletronorte, 2010).

As distâncias mínimas de segurança entre o condutor e árvores, rodovias, estruturas, entre outros são estabelecidas pela NBR 5422 (1985). Portanto, a necessidade de um sistema capaz de minimizar esse problema é observada em diversas parte do mundo (Lüssi, 2009).

Para resolver este problema as soluções potenciais são: diminuir o tamanho dos vãos, aumentar a altura das torres, diminuir a carga nas linhas, retracionar os cabos ou utilizar outros tipos de cabos capazes de suportar o aumento de temperatura sem sofrer as flechas excessivas (Shirmohamadi, 2002). Dentre essas soluções, o retracionamento do cabo é tecnicamente mais simples, embora tenha como restrição o indesejado aumento da EDS (*Every Day Stress*) ou tensão de pré-tensionamento.

Nesse sentido, foi desenvolvido pela empresa americana *Material Integrity Solution Inc.* um dispositivo denominado *Sagging Line Mitigator* – SLiM baseado no comportamento termomecânico das Ligas com Memória de Forma (Shirmohamadi, 2002). Esse dispositivo é capaz de reagir à variação de temperatura do cabo e retracioná-lo de forma a reduzir a flecha a níveis permitidos.

Os Materiais com Memória de Forma, do inglês *Shape Memory Alloys* – SMA, são materiais que demonstram a capacidade de recuperar uma deformação quando sujeitos a um ciclo térmico ou mecânico apropriado (Delaey et al., 1975). Baseado nesse comportamento, o SLiM é deformado por ação do peso do cabo e o retraciona quando, função da temperatura, a flecha atinge determinado valor pré-estabelecido garantindo assim que a distância de segurança seja respeitada.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é analisar um dispositivo mitigador de flecha em cabos condutores de energia elétrica baseado no comportamento termomecânico das SMA. O dispositivo deve ser capaz de reagir a variações de temperatura e evitar que a distância de segurança seja ultrapassada.

1.3 METODOLOGIA

As diretrizes metodológicas a serem seguidas partem de uma avaliação analítica numérica do comportamento do SLiM. Para desenvolver esta análise será utilizado um modelo para ligas com memória de forma que permita simular o comportamento do atuador, que por sua vez será acoplado às equações para determinação de flecha. Assim, poder-se-á analisar o comportamento da flecha de um cabo condutor submetido a uma variação de temperatura com e sem a atuação do mitigador de flecha.

Por meio de simulação numérica foi realizada a caracterização termomecânica da liga Niquel-Titânio utilizada no projeto de Kevin Lüssi, trabalho no qual foi realizado uma análise experimental do SLiM.

1.4 DESCRIÇÃO DO RELATÓRIO

O presente trabalho foi dividido em quatro capítulos. O primeiro apresenta a contextualização do problema, as motivações para o desenvolvimento do trabalho, os objetivos e as diretrizes metodológicas a serem seguidas. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre ligas com memória de forma, assim como seu comportamento termomecânico e seus aspectos microestruturais. Aborda também a norma que orienta as condições de segurança em projetos de linhas de transmissão de energia elétrica bem como as equações para determinação de flecha. Ainda no Capítulo 2 é apresentado o modelo para ligas com memória de forma proposto por Brinson (1993). No Capítulo 3 é apresentado uma análise do SLiM. Por fim, no Capítulo 4, são apresentadas as conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COMPORTAMENTO TERMOMECANICO DAS LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

As ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys* - SMA) são materiais metálicos que apresentam a habilidade de recuperar a geometria original previamente definida através da imposição de um campo de temperatura e/ou de tensão, devido à transformações de fases induzidas no material. Em outras palavras, demonstram a capacidade de retomar uma forma ou tamanho previamente definido quando sujeitos a um ciclo térmico ou mecânico apropriados (Delaey et al., 1975, Krishnan et al., 1975, Warlimont, et al., 1974, Otsuka e Wayman, 1998, Funakubo, 1987).

Essa habilidade de recuperar uma forma particular está diretamente associada a transformações de fase martensíticas induzidas térmica e mecanicamente (Delaey et al., 1975, Krishnan et al., 1975, Warlimont, et al., 1974). O seu comportamento é fortemente dependente da temperatura, uma vez que em função dela as SMA podem existir em diferentes fases. A Figura 2.1 representa esquematicamente a evolução da fração volumétrica de martensita ξ , definida como sendo a razão entre o volume da fase martensítica e o volume total da liga, em função da temperatura T . São identificadas quatro temperaturas características: M_s (*Martensite start*) é a temperatura inicial de formação de martensita, M_f (*Martensite finish*) é a temperatura final de formação de martensita, A_s (*Austenite start*) é a temperatura inicial de formação de austenita e A_f (*Austenite finish*) é a temperatura final de formação de austenita.

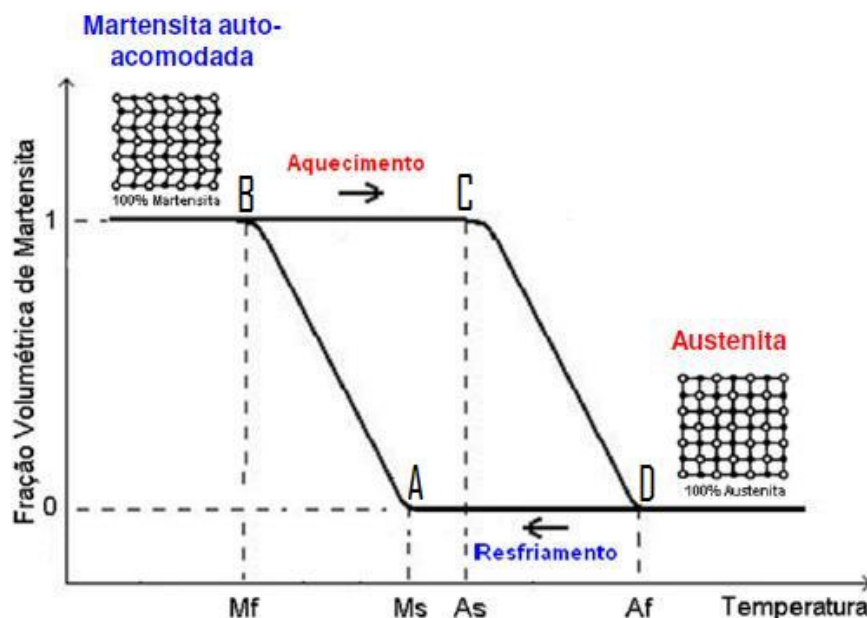


Figura 2.1 – Evolução da fração volumétrica de martensita com a temperatura - Esquemático.

Associa-se à Figura 2.1 uma amostra de SMA a uma temperatura acima de A_f e livre de tensões. O material existe na fase austenítica. Partindo do ponto D , com o decréscimo da temperatura, a estrutura cristalina experimenta uma transformação de fase martensítica. Este processo se inicia em $T = M_s$ (ponto A) e se desenvolve até que a temperatura $T = M_f$ seja atingida (ponto B), abaixo da qual a estrutura cristalina da liga é totalmente martensítica. Elevando-se a temperatura, a partir do ponto B , ao atingir A_s (ponto C), observa-se uma transformação de fase inversa (martensita transformando-se em austenita), que persiste até que a temperatura A_f seja alcançada (ponto D). Acima de A_f , a liga é constituída totalmente por austenita. Estas temperaturas são características de cada liga e variam em função, basicamente, da composição química e de tratamentos térmicos (Delaey et al., 1975, Krishnan et al., 1975, Warlimont, et al., 1974, Otsuka e Wayman, 1998, Funakubo, 1987). Portanto, as transformações de fase martensíticas desenvolvem um papel fundamental no comportamento termomecânico das SMA, e de maneira especial as transformações martensíticas termoelásticas.

2.1.1 TRANSFORMAÇÃO DE FASE MARTENSÍTICA TERMOELÁSTICA

A transformação martensítica é um tipo de transformação de fase com as seguintes características:

- Transformação não difusa: não há movimentos atômicos em distâncias consideráveis, de forma que não há variação de composição química;
- Movimento cooperativo de átomos: conduzem à formação de uma nova fase, mais estável, através de uma reordenação atômica a curtas distâncias;

A Figura 2.2 ilustra esquematicamente a transformação martensítica. Ela envolve movimento coordenado de átomos e deformação cisalhante.

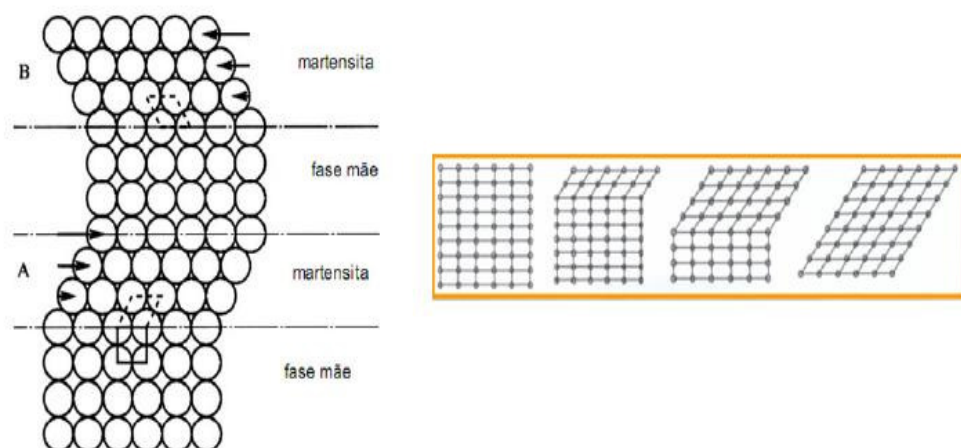


Figura 2.2 – Movimento coordenado e deformação cisalhante que ocorre na transformação martensítica (Novák et al., 2008).

A Tabela 2.1 apresenta as principais características mecânicas referentes às fases martensítica e austenítica.

Tabela 2.1 – Características gerais das fases martensita e austenita.

Martensita	Austenita
Fase de baixa temperatura ($T < M_s$)	Fase de alta temperatura ($T > A_s$)
Estrutura tetragonal de corpo centrado	Estrutura geralmente cúbica
Menos rígida	Fase de maior rigidez ($D_A \approx 3 \cdot D_M$)
Flexível e facilmente deformável	Maior dureza e menos flexível

No caso das ligas a base de Níquel-Titânio, a fase martensítica apresenta uma estrutura monoclinica **B19'**. Enquanto que a fase austenítica apresenta uma estrutura cúbica de corpo centrado B2 (CCC – B2), onde os átomos de níquel se encontram no centro da estrutura cúbica. A Figura (2.3) apresenta as estruturas correspondentes às fases austenítica e martensítica (Novák et al., 2008).

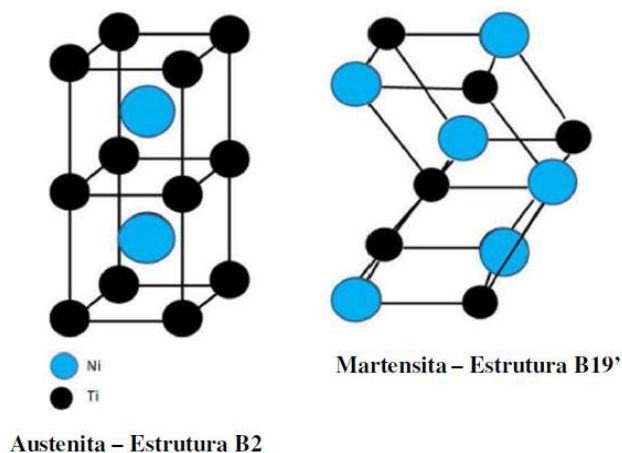


Figura 2.3 – Modelo de esferas reduzidas que representam as estruturas correspondentes às fases austenítica e martensítica.

Quando solicitadas mecanicamente e, em função da temperatura, as SMA apresentam basicamente três fenômenos: abaixo de M_f a quasiplasticidade, acima de A_f a pseudoelasticidade e na transição de uma temperatura inferior à M_s para uma temperatura superior à A_s , após ser deformada abaixo de M_s , o efeito memória de forma (Delaey et al., 1975, Krishnan et al., 1975, Warlimont, et al., 1974, Otsuka e Wayman, 1998, Funakubo, 1987).

2.1.2 QUASIPLASTICIDADE

Considere uma amostra de SMA a uma temperatura inferior a M_f . Nesta temperatura e livre de tensões a liga existe numa fase martensítica denominada auto-acomodada ou maclada (Paiva, 2004). Essa martensita auto-acomodada é caracterizada por uma estrutura formada por diferentes variantes de martensita, com diferentes orientações que podem ser até 24 e é formada com o resfriamento da austenita livre de tensões (Batra, 1999). Na Figura (2.4) considere a existência de apenas duas variantes. Com a aplicação de uma força trativa será observada uma resposta elástica até que uma determinada tensão crítica σ_{CRIT} seja alcançada (ponto A). Em seguida, quando a martensita auto-acomodada (ou maclada) é submetida a uma tensão superior a σ_{CRIT} , observa-se a formação da martensita reorientada, trecho AB. O processo de reorientação da martensita maclada não envolve deformação plástica. Após uma deformação relativamente grande, que em algumas ligas pode chegar a 10% (Delaey et al., 1975), o material volta a apresentar um comportamento elástico. Ao descarregar a amostra, a mesma manterá a sua deformação, representada por D_o , como uma deformação quasiplástica. Este comportamento é denominado quasiplasticidade (Paiva, 2004).

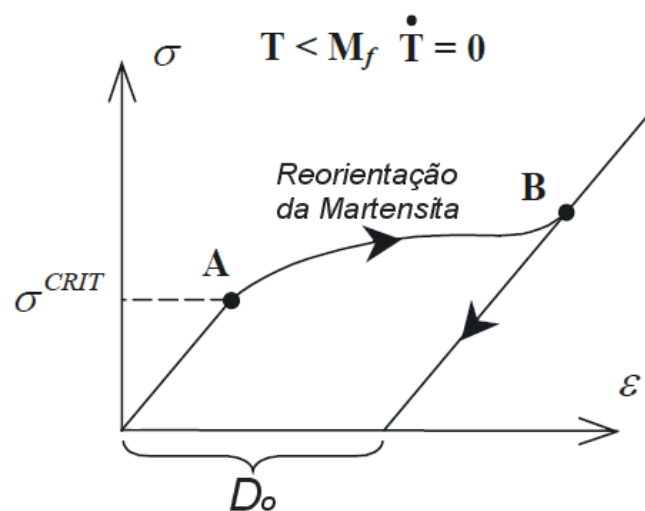


Figura 2.4 – Curva Tensão-Deformação quasiplástica típica (Paiva, 2003).

2.1.3 EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA

O efeito memória de forma consiste basicamente da recuperação de deformação quasiplástica por meio do aquecimento do material deformado a uma temperatura acima da A_f . O aquecimento acima da A_f induz a transformação reversa (Martensita \rightarrow Austenita) e, conseqüentemente, a recuperação da deformação residual D_o . A Figura (2.5) ilustra esquematicamente esse processo. A recuperação de forma com o aquecimento se explica pelo fato de que acima de A_f a única fase termodinamicamente estável é a austenita, e essa fase desconhece a deformação quasiplástica.

A martensita pode existir acima de A_f apenas sob carga (Delaey et al., 1975, Krishnan et al., 1975, Warlimont, et al., 1974, Otsuka e Wayman, 1998, Funakubo, 1987).

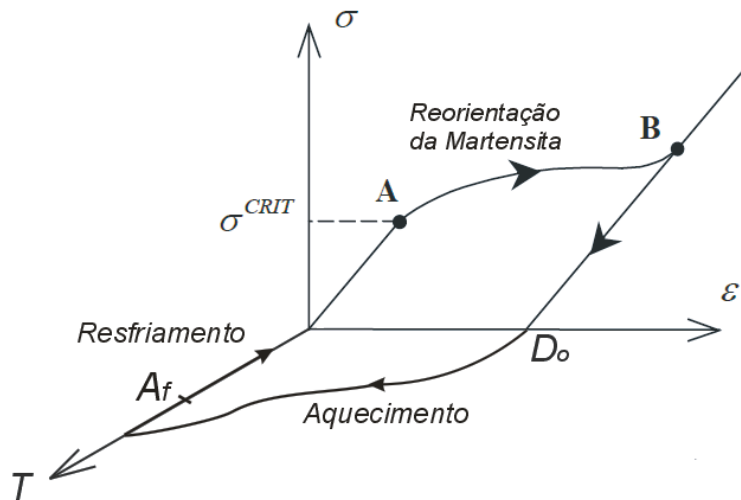


Figura 2.5 – Efeito de Memória de Forma – Esquemático (Paiva, 2003).

2.1.4 PSEUDOELASTICIDADE

Considere agora uma amostra de SMA a uma temperatura superior a A_f . Nesta situação, a fase austenítica é a estável (Delaey et al., 1975, Krishnan et al., 1975, Warlimont, et al., 1974, Otsuka e Wayman, 1998, Funakubo, 1987). De acordo com a Figura (2.6), para uma temperatura constante $T > A_f$, com a aplicação de um carregamento mecânico, o material se comporta elasticamente até que uma tensão crítica σ_{CRIT} seja alcançada (ponto A), quando, então, dá-se início uma transformação de fase direta (Austenita \rightarrow Martensita), trecho AB. Com a retirada da carga, o material experimenta uma transformação reversa (Martensita \rightarrow Austenita), trecho CD. Já que para $T > A_f$ a martensita é uma fase instável fora da presença de um campo de tensões.

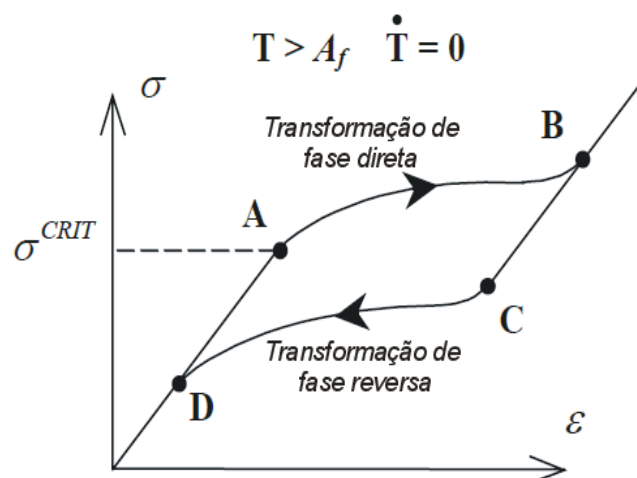


Figura 2.6 – Curva tensão-deformação pseudoelástica típica – Esquemática (Paiva, 2003).

Este comportamento é denominado pseudoelasticidade e está associado a uma transformação de fase martensítica induzida por tensão (Delaey et al., 1975, Krishnan et al., 1975, Warlimont, et al., 1974, Otsuka e Wayman, 1998, Funakubo, 1987).

2.2 ASPECTOS NORMATIVOS DO PROJETO

O projeto mecânico de linhas de transmissão e energia elétrica é orientado pela NBR 5422 (ABNT, 1985). No que diz respeito ao presente projeto, a NBR 5422 estabelece as distâncias de segurança que são os afastamentos mínimos recomendados do condutor e seus acessórios energizados e quaisquer partes, energizadas ou não, da própria linha, do terreno ou dos obstáculos atravessados.

Basicamente, dois métodos são considerados para determinação das distâncias de segurança: o método convencional e o método alternativo.

2.2.1 MÉTODO CONVENCIONAL

Neste método as distâncias de segurança são calculadas pelas Equações (2.1) e (2.2) (NBR 5422, 1985):

$$D = A + 0,01 \left(\frac{D_U}{\sqrt{3}} - 50 \right), \text{ se } U > 87kV. \quad (2.1)$$

Ou,

$$D = a, \text{ se } U \leq 87kV, \quad (2.2)$$

onde:

D = Distância de segurança;

A = Distância básica;

D_U = é a distância em metros numericamente igual a U .

U = tensão máxima de operação da linha, valor eficaz fase-fase, em kV;

A Tabela 2.2 apresenta valores de A para as situações mais comuns.

Para altitudes superiores a 1000 metros em relação ao nível do mar, o valor do segundo termo da Eq. (2.1) deve ser acrescido de 3% para cada 300 metros de altitude acima de 1000 metros (NBR 5422, 1985). Em locais acessíveis somente a pessoal autorizado, podem ser utilizadas distâncias menores que as calculadas pela fórmula básica (NBR 5422, 1985). Ressalta-se que as distâncias indicadas para telhados e terraços são válidas para os casos em que os mesmos não sejam acessíveis a pedestres. Caso contrário, o espaçamento deve ser de 6m. As distâncias devem ainda ser aumentadas convenientemente, se isso se fizer necessário, em vista da existência de equipamentos como guindastes ou andaimes, piscinas, jardins, ou de execução de trabalhos de conservação, extinção de incêndios, etc. (NBR 5422, 1985).

Tabela 2.2 – Distâncias básicas (NBR 5422, 1985).

Natureza da região ou obstáculos atravessados pela linha ou que dela se aproxime	Distância básica A (m)
Locais acessíveis apenas a pedestres	6,00
Locais onde circulam máquinas agrícolas	6,50
Rodovias, ruas e avenidas	8,00
Ferrovias não eletrificadas	9,00
Ferrovias eletrificadas ou com previsão de eletrificação	12,00
Suporte de linha pertencente à ferrovia	4,00
Águas navegáveis	H+2,00
Águas não navegáveis	6,00
Linhas de energia elétrica	1,20
Linhas de telecomunicações	1,80
Telhados e terraços	4,00
Paredes	3,00
Instalações transportadoras	3,00
Veículos rodoviários e ferroviários	3,00

No cálculo da distância dos condutores às paredes cegas, nas quais, por acordo entre as partes interessadas, não for permitida a abertura de janelas, portas, etc., ressalvas as disposições legais pertinentes, a distância mínima pode ser calculada pela Eq. (2.3), adotando-se 0,5m como o valor mínimo.

$$D = \frac{D_U}{150}. \quad (2.3)$$

2.2.2 MÉTODO DE CÁLCULO ALTERNATIVO

As distâncias calculadas pelo método alternativo (Eq. 2.4) não podem ser menores do que as calculadas pelas Eqs. (2.1) e (2.2), para U igual a 169kV. Caso sejam menores, devem ser adotados os valores calculados pelas Eqs. (2.1) e (2.2) para U igual a 169kV (NBR 5422, 1985).

$$D = A_1 + \left[\frac{\left(\frac{\sqrt{2 \cdot D_U}}{\sqrt{3}} \cdot P_U + V_L \right) a_2}{500 \cdot k} \right]^{1,667} \cdot b \cdot n, \quad (2.4)$$

onde:

A_1 = distância básica apresentada na Tabela 2.3;

D_U = valor, em metros, numericamente igual à tensão máxima de operação em kV. Nos casos de travessias de linhas de energia elétrica, D_U refere-se à tensão mais elevada das linhas consideradas;

V_L = valor, em metros, numericamente igual à tensão máxima de crista para terra, em kV, da linha de tensão menos elevada (só se aplica a distâncias verticais entre linhas de energia elétrica);

P_U = valor de sobretensão de manobra, expresso por unidade do valor de crista da tensão máxima de operação entre fase e terra, definido para o nível correspondente a uma probabilidade de 98% de não ser excedido;

$a_2 = 1,15$ – fator correspondente a 3 desvios padrões;

$b = 1,03$ – fator de correção para condições atmosféricas diferentes das condições normais;

n = coeficiente de segurança - Tabela (2.3);

k = fator de forma - Tabela (2.3).

Tabela 2.3 – Parâmetros para cálculo de distância de segurança (NBR 5422, 1985).

Natureza da região dos obstáculos atravessado pela linha ou que dela se aproxime	Distância básica A_I (m)	Coeficiente de segurança c	Fator de forma k
Locais acessíveis apenas a pedestres	2,80	1,2	1,15
Locais onde circulam máquinas agrícolas	4,30	1,2	1,15
Rodovias, ruas e avenidas	4,30	1,2	1,15
Ferrovias não eletrificadas	6,70	1,2	1,15
Águas navegáveis	H+0,80	1,2	1,15
Águas não navegáveis	4,30	1,2	1,15
Telhados e terraços	2,80	1,2	1,15
Paredes	1,50	1,0	1,15
Linhas de energia elétrica	0,00	1,2	1,40
Linhas de telecomunicações	0,60	1,2	1,40

Para altitudes superiores a 450 metros em relação ao nível do mar, o valor do segundo termo da Eq. (2.4) deverá ser acrescido de 3% para cada 300 metros de altitude acima de 450 (NBR 5422, 1985).

2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CABOS CONDUTORES

Uma corrente de elos iguais, ao ser estendida entre dois suportes suficientemente elevados para que não se apoie sobre o solo adquire uma forma característica e que, por isso mesmo, recebe o nome de catenária [do latim *catena*, cadeia] (Talavera, 2008). Os condutores de linhas aéreas de transmissão, normalmente constituídas por cabos, podem ser considerados suficientemente flexíveis quando os pontos de suspensão estiverem razoavelmente afastados entre si, de forma a descreverem, quando suspensos, curvas semelhantes a catenárias. Isto pode ser demonstrado matematicamente quando se considera a rigidez à flexão do cabo (Fuchs & Almeida, 1982). Entretanto, historicamente, por simplicidade, considerava-se a função da parábola.

Talavera (2008) indica que a diferença entre parábola e a catenária tem origem na formulação do problema: caso o peso próprio do cabo seja modelado como uma carga uniformemente distribuída

na horizontal, chega-se à equação da parábola (Fig. 2.7). Por outro lado, caso o peso próprio do cabo seja modelado como uma carga uniformemente distribuída que acompanha a forma do cabo (na condição deformada), chega-se à equação da catenária, como mostrado na Fig. (2.8).

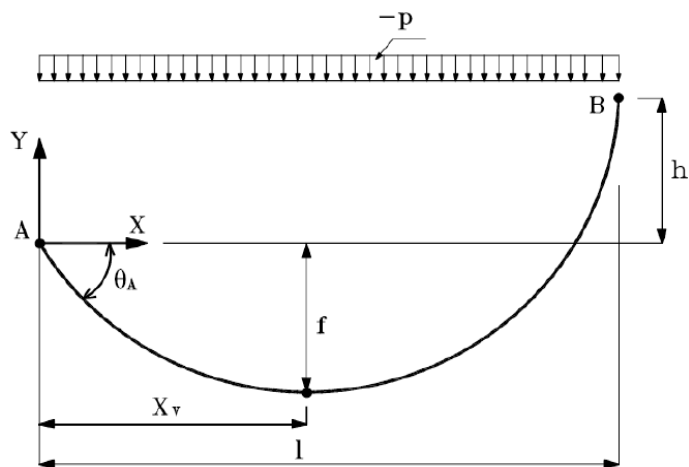


Figura 2.7 – Peso próprio do cabo representado pela função parabólica (Pereira Junior, 2002).

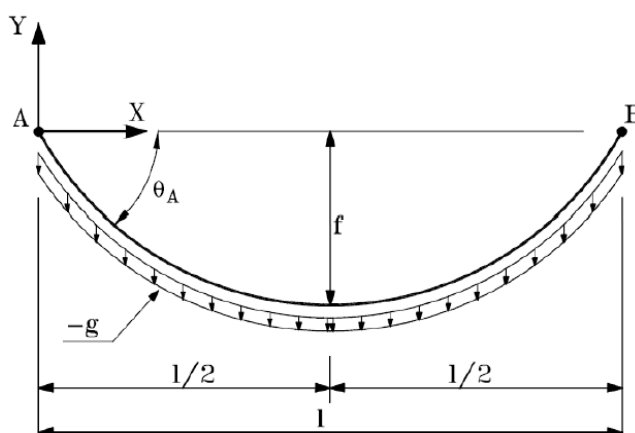


Figura 2.8 – Peso próprio do cabo representado pela função catenária (Pereira Junior, 2002).

Na seção 2.3.1 serão descritos os modelos analíticos que serão utilizados como base para os cálculos a serem realizados neste trabalho.

2.3.1 REPRESENTAÇÕES MATEMÁTICAS DA POSIÇÃO DO CABO

Considere a Figura (2.9), que representa um condutor suspenso em dois suportes rígidos, A e B, separados entre si por uma distância a . Essa distância comumente recebe o nome de vão. Como os pontos A e B estão a uma mesma altura, a curva descrita pelo condutor será simétrica, e seu ponto mais baixo, o vértice O, encontra-se sobre um eixo a meia-distância entre A e B.

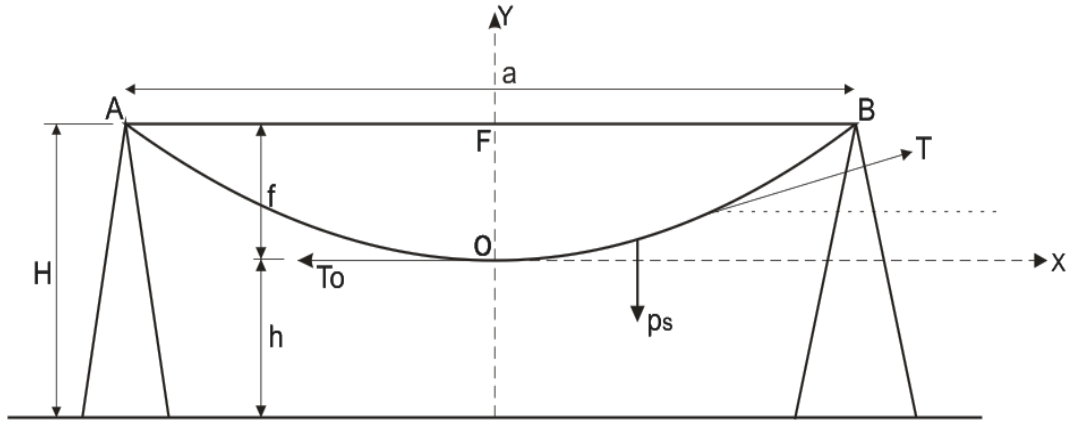


Figura 2.9 – Condutor suspenso em dois suportes de mesma altura (Fuchs & Almeida, 1982).

A distância $OF = f$ recebe o nome de flecha. Nas linhas de transmissão, as alturas de suspensão (H) dos condutores estão diretamente relacionadas com o valor das flechas e com as distâncias dos vértices das curvas ao solo (h). A flecha formada depende do vão, da temperatura e do valor da tração aplicada ao cabo nos pontos de fixação A e B.

A altura h , denominada *altura de segurança*, é estabelecida por normas, em função da classe de tensão da linha, do tipo de terrenos e dos objetos atravessados pelas linhas (Fuchs & Almeida, 1982).

Na Figura (2.9), para um sistema de coordenadas centrado em O, a função da catenária é:

$$y = \frac{T_o}{p} \left[\cosh \left(\frac{x}{T_o/p} - 1 \right) \right]. \quad (2.5)$$

Designando $C = T_o/p$, tem-se:

$$y = C \left[\cosh \left(\frac{x}{C} - 1 \right) \right], \quad (2.6)$$

onde y é posição vertical do cabo, x a posição horizontal do cabo, C o parâmetro de catenária (m) dado por:

$$C = \frac{T_o}{p}, \quad (2.7)$$

onde T_o é a componente horizontal da força axial do cabo (daN) e p o peso unitário do cabo (daN/m).

Deve-se observar que o parâmetro da catenária C é uma característica geométrica da função e a unidade de medida é dada em metros. Portanto, qualquer cabo com o mesmo parâmetro da catenária C , no mesmo vão, tem a mesma flecha. Fazendo-se um desenvolvimento em série da Eq. (2.6), chega-se à função parabólica que melhor representa a curva formada pelo cabo suspenso:

$$y = \frac{x^2}{2C} = \frac{px^2}{2T_o}. \quad (2.8)$$

2.3.2 CÁLCULO DA FLECHA

Uma informação extremamente útil para uso em projetos de linhas de transmissão é a flecha, indicada na Fig. (2.9) por f . Flecha é a distância vertical entre uma reta que liga os dois pontos de fixação, ou seja, a corda e linha reta tangente à curva. Como mencionado anteriormente, a flecha depende do comprimento do vão, da temperatura do cabo e da tração aplicada ao cabo quando este é instalado.

A flecha pode ser calculada admitindo uma parábola como a função que define o eixo do cabo ou tomando-se a forma de uma catenária, que seria a melhor aproximação. Na prática, a utilização da parábola ou invés da catenária conduz a pequenos erros quando o vão também é pequeno (Pereira Junior, 2002). Por exemplo, menor que 450 metros:

$$f = \frac{pa^2}{8T_o}, \quad (2.9)$$

onde T_o é a componente horizontal da força axial do cabo (N), p o peso unitário do cabo (N/m) e a o vão entre os suportes A e B .

Adotando a expressão da catenária, a flecha tem a seguinte expressão:

$$f = C \left[\cosh \left(\frac{a}{2C} - 1 \right) \right]. \quad (2.10)$$

2.3.3 CÁLCULO DO COMPRIMENTO DO CABO

O comprimento do cabo condutor L (m) pode ser determinado pela Eq. (2.11) (Fuchs & Almeida, 1982):

$$L \cong a + \frac{8f^2}{3a}, \quad (2.11)$$

onde a é o vão entre os suportes A e B (m), e f a flecha formada pelo condutor dada em metros. A Equação (2.11) é a equação do comprimento de uma parábola, desenvolvida em função da flecha e de sua abertura.

2.3.4 CÁLCULO DA MUDANÇA DE ESTADO

Os condutores das linhas de transmissão estão sujeitos a variações de temperaturas bastante acentuadas (Shirmohamadi, 2002). Sua temperatura depende, a cada instante, do equilíbrio entre o calor ganho e o calor cedido ao meio ambiente. O ganho de calor que experimentam se deve principalmente ao efeito Joule da corrente e também ao aquecimento pelo calor solar. Eles perdem calor para o meio ambiente por irradiação e por convecção. As perdas por irradiação dependem da diferença de temperatura do condutor e do ar ambiente e as perdas por convecção, dessa mesma diferença de temperatura e também da velocidade do vento que os envolve. A determinação exata de sua temperatura para as diversas combinações de valores desses elementos que podem ocorrer é um tanto trabalhosa e, a rigor, só pode ser feita em termos estatísticos, com base em modelos meteorológicos, nas cargas elétricas, nos sistemas e na probabilidade de ocorrências simultâneas (Fuchs & Almeida, 1982).

Nos cálculos mecânicos dos condutores é usual atribuir-se a estes a temperatura do meio ambiente, com acréscimos no caso das temperaturas externas superiores, pois é destas que dependem os valores das flechas máximas. Em fase de projeto, servem para a escolha da posição das estruturas, visando uma altura de segurança mínima, mesmo na condição de operação mais desfavorável: sol intenso e cargas elétricas elevadas, com ausência de vento.

Os coeficientes de dilatação térmica linear dos materiais com que os cabos são confeccionados têm valores significativos, provocando contrações e dilatações consideráveis sob variação de temperatura. Um aumento de temperatura provoca sua dilatação e uma redução de temperatura, sua contração. Essas variações de comprimento dos condutores são diretamente proporcionais aos seus coeficientes de dilatação térmica e à variação da temperatura. Uma vez que a flecha do condutor depende de seu comprimento, esta variará de acordo com a temperatura. Por outro lado, a tração T_0 é inversamente proporcional ao valor da flecha; portanto o valor de T_0 variará também com a variação da temperatura do condutor. Aumentará com a redução de temperatura e vice-versa (Fuchs & Almeida, 1982). A forma mais adequada de se calcular essa variação é através das chamadas equações da mudança de estado.

Considerando o exposto, conclui-se, pelo desenvolvimento das equações, que a equação de mudança de estado devido à variação de temperatura é (Fuchs & Almeida, 1982):

$$T_{02}^3 + T_{02}^2 \left[\frac{DS p^2 Y^2}{24 T_{01}^2} + DS \alpha_t (t_2 - t_1) - T_{01} \right] = \frac{DS p^2 Y^2}{24}, \quad (2.12)$$

onde:

T_{01} e T_{02} = trações horizontais nos estados 1 e 2 (N);

D = módulo de elasticidade (N/mm^2);

S = seção do condutor (mm^2);

α_i = coeficiente de dilatação térmica ($1/^\circ\text{C}$);

p = peso linear do cabo (N/m);

t_1 e t_2 = temperaturas nos estados 1 e 2 ($^\circ\text{C}$).

2.4 MODELO DE BRINSON PARA SMA

Dentre os diversos modelos propostos para representar o comportamento termomecânico das ligas com memória de forma, o modelo proposto por Brinson (1993) é um dos mais simples e mais utilizados. Na realidade, o modelo de Brinson é uma evolução do modelo proposto por Tanaka (1985) cujas equações constitutivas e cinéticas são dadas respectivamente por:

$$\dot{\sigma} = D\dot{\epsilon} - \tau\dot{T} - \Omega\dot{\xi}, \quad (2.13)$$

$$\begin{cases} \xi = 1 - \exp[b_M c_M (M_s - T) - b_M \sigma] & (A \rightarrow M), \\ \xi = \exp[b_A c_A (A_s - T) + b_A \sigma] & (M \rightarrow A), \end{cases} \quad (2.14)$$

onde:

D = Módulo de elasticidade;

ξ = Fração volumétrica de martensita;

Ω = Coeficiente de transformação de fase;

τ = Coeficiente de expansão térmica;

c_A, c_M, b_A, b_M = constantes materiais (relacionam temperatura e tensões críticas de transformação).

Essa modelagem é baseada em teorias nas quais cada ponto do material é representado por uma mistura de fases cujas características microestruturais são descritas por uma ou mais variáveis descritivas. A característica chave desse modelo é o uso de uma ou mais variáveis internas para descrever a estrutura interna do material.

Na forma diferencial a equação constitutiva do modelo de Tanaka é dada por:

$$d\sigma = D(\epsilon, \xi, T)d\epsilon + \Omega(\epsilon, \xi, T)d\xi + \tau(\epsilon, \xi, T)dT. \quad (2.15)$$

Assumindo que as funções materiais D , Ω e τ sejam constantes para um dado material, o modelo de Tanaka pode ser representado na forma integral como:

$$\sigma - \sigma_0 = D(\varepsilon - \varepsilon_0) + \Omega(\xi - \xi_0) + \tau(T - T_0), \quad (2.16)$$

onde $\sigma_0, \varepsilon_0, \xi_0, T_0$ representam o estado inicial (ou condições iniciais) do material.

O modelo de Brinson (1993) é uma evolução do modelo de Tanaka, contudo ele reescreve o módulo de elasticidade D em função de T e de ξ , e decompõe ξ em duas partes: ξ_T que representa a martensita termicamente induzida e ξ_S que representa a martensita mecanicamente induzida:

$$\xi = \xi_S + \xi_T, \quad (2.17)$$

$$D(\xi) = D_A + \xi(D_M - D_A). \quad (2.18)$$

Assim, a equação constitutiva do modelo de Brinson na forma integral é dada por:

$$\sigma - \sigma_0 = D(\xi)\varepsilon - D(\xi_0)\varepsilon_0 + \Omega(\xi)\xi_S - \Omega(\xi_0)\xi_{S0} + \tau(T - T_0). \quad (2.19)$$

A cinética de transformação direta (Austenita \rightarrow Martensita) para $T > M_S$ e $\sigma_S^{cr} + C_M(T - M_S) < \sigma < \sigma_f^{cr} + C_M(T - M_S)$ é expressa por:

$$\xi_S = \frac{1 - \xi_{S0}}{2} \cos \left\{ \frac{\pi}{\sigma_S^{cr} - \sigma_f^{cr}} [\sigma - \sigma_f^{cr} - C_M(T - M_S)] \right\} + \frac{1 + \xi_{S0}}{2} \quad e \quad (2.20)$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1 - \xi_{S0}} (\xi_S - \xi_{S0}). \quad (2.21)$$

Enquanto na reorientação da martensita (Martensita Maclada \rightarrow Martensita Reorientada) para $T < M_S$ e $\sigma_S^{cr} < \sigma < \sigma_f^{cr}$, as equações cinemáticas são:

$$\xi_S = \frac{1 - \xi_{S0}}{2} \cos \left[\frac{\pi}{\sigma_S^{cr} - \sigma_f^{cr}} (\sigma - \sigma_f^{cr}) \right] + \frac{1 + \xi_{S0}}{2} \quad e \quad (2.22)$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1 - \xi_{S0}} (\xi_S - \xi_{S0}) + \Delta_{T\xi}, \quad (2.23)$$

onde, se $M_f < T < M_s$ e $T < T_0$;

$$\Delta_{T\xi} = \frac{1 - \xi_{T0}}{2} \left\{ \cos \left[a_M (T - M_f) \right] + 1 \right\}, \quad (2.24)$$

Senão;

$$\Delta_{T\xi} = 0. \quad (2.25)$$

Por fim, na transformação reversa (Martensita \rightarrow Austenita) ocorre para $T > A_s$ e $C_A(T - A_f) < \sigma < C_A(T - A_s)$, as equações cinemáticas são:

$$\xi_S = \xi_{S0} - \frac{\xi_{S0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi), \quad (2.26)$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi). \quad (2.27)$$

2.4.1 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Nesta seção, serão apresentadas algumas simulações numéricas do modelo discutido. Considera-se uma liga Níquel-Titânio (Ni₅₅Ti) cujas propriedades termomecânicas são fornecidas por Dye (1990) e Liang (1990). Os valores das propriedades materiais são listados na Tab. (2.4).

Tabela 2.4 – Propriedades da liga NiTi (Dye, 1990; Liang, 1990).

Módulo de Elasticidade	Temperaturas de Transformação	Constantes de Transformação	Máxima deformação residual
$D_A = 67 \times 10^3 \text{ MPa}$	$M_f = 9^\circ \text{C}$	$C_M = 8 \text{ MPa} / ^\circ \text{C}$	$\varepsilon_L = 0,067$
$D_M = 26,3 \times 10^3 \text{ MPa}$	$M_s = 18,4^\circ \text{C}$	$C_A = 13,8 \text{ MPa} / ^\circ \text{C}$	
$\tau = 0,55 \text{ MPa} / ^\circ \text{C}$	$A_s = 34,5^\circ \text{C}$	$\sigma_s^{cr} = 100 \text{ MPa}$	
	$A_f = 49^\circ \text{C}$	$\sigma_f^{cr} = 170 \text{ MPa}$	

As Equações (2.13) a (2.26) e as propriedades materiais apresentadas na Tab. (2.4) foram utilizadas para descrever a curva tensão-deformação da liga Níquel-Titânio em várias temperaturas. Os resultados para uma ampla variação de temperaturas são mostrados na Fig. (2.10) e os resultados para temperaturas menores que M_s são apresentados na Fig. (2.11).

Na Figura (2.10) o comportamento pseudoelástico foi caracterizado pelas curvas para $T = 40^\circ\text{C}$ e $T = 60^\circ\text{C}$. Com a diminuição da temperatura abaixo de A_f , tem-se somente recuperação parcial da deformação e o material existe nas formas de martensita orientada e austenita depois de descarregado. Na temperatura de 60°C , acima de A_f , o material exibe histerese completa durante o ciclo. Quer dizer, o material 100% austenítico, durante o carregamento se transforma em martensita reorientada (demaclada) e completa a transformação inversa para austenita com o descarregamento.

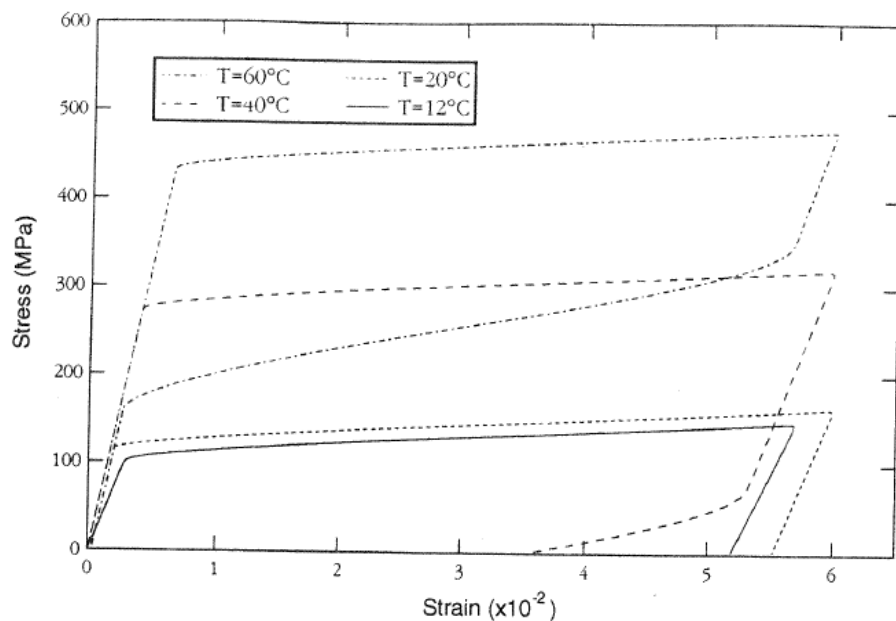


Figura 2.10 – Curva tensão-deformação ilustrando a pseudoelasticidade e o efeito de memória de forma (Brinson, 1993).

Portanto, como pode ser observado pelas Figuras 2.10 e 2.11, o modelo de Brinson é capaz de representar as principais características do comportamento termomecânico das SMA, ou seja, os comportamentos quasiplástico e o pseudoelástico. No presente projeto, o modelo de Brinson será implementado numericamente para simular a curva deformação x temperatura do cabo submetido à carga constante em função do seu próprio peso e a uma história de temperatura.

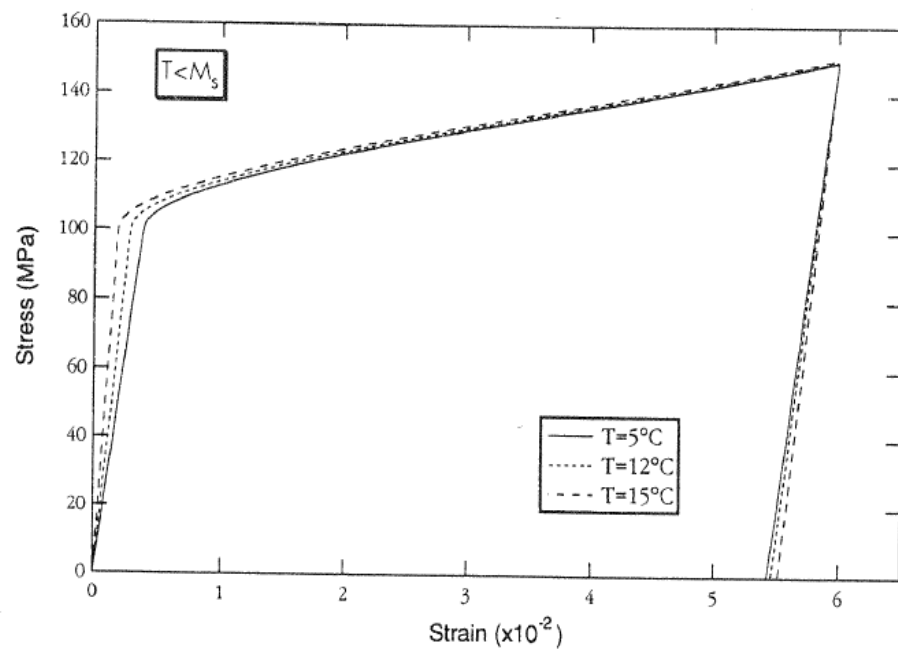


Figura 2.11 – Curva tensão-deformação para a máxima deformação residual (Brinson, 1993).

3 ANÁLISE DO SLiM – *Sagging Line Mitigator*

A capacidade de transmissão de corrente (ampacidade) em linhas de transmissão elétrica é limitada basicamente por dois fatores (Shirmohamadi, 2002):

- Temperatura do condutor;
- Flecha formada pelo cabo de transmissão.

A energia térmica adquirida pelo condutor devido à corrente elétrica (efeito Joule) e às altas temperaturas ambientes causam expansão térmica nas linhas de transmissão, aumentando significativamente o comprimento do condutor e conseqüentemente a flecha formada. Na Figura (3.1) é ilustrado o aumento da flecha de Δf correspondente ao aumento de temperatura de T_0 para T_1 .

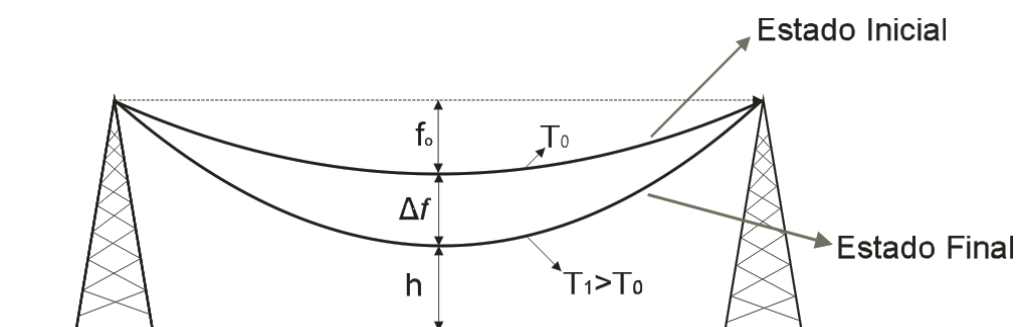


Figura 3.1 – Aumento da flecha formada devido à variação de temperatura.

Contudo, existem normas que fixam as condições básicas de segurança para o projeto de linhas de transmissão de energia elétrica, garantindo afastamentos mínimos do condutor e seus acessórios energizados do terreno, de árvores, rodovias, estruturas, entre outros (NBR 5422, 1985). Essa distância de segurança é representada na Fig. (3.1) por h . Muitas vezes é necessário limitar a quantidade de corrente que pode ser transportada pela linha, evitando que o cabo sofra grande expansão linear e ultrapasse a distância de segurança. No entanto, existem maneiras de solucionar o aumento excessivo de flecha:

- Aumentar as torres de transmissão;
- Redimensionar a linha de transmissão;
- Retracionar os cabos;
- Diminuir a carga nas linhas.

O grande problema em implementar essas soluções se deve aos altos custos financeiros, já que as linhas de transmissão ligam grandes distâncias, tendo assim de aumentar uma grande quantidade de torres ou redimensionar vários quilômetros de cabos condutores (Shirmohamadi, 2002).

Uma solução alternativa às convencionais é o emprego de dispositivo que seja capaz de reagir às variações de temperatura retracionando o cabo e evitando o aumento excessivo da flecha. Um exemplo desse tipo de sistema é o *Sagging Line Mitigator – SLiM* - desenvolvido pela *Material Integrity Solution Inc.* dos Estados Unidos da América.

3.1 DESCRIÇÃO DO SLiM

O *SLiM* é um dispositivo que ajusta a tensão no cabo condutor contraindo-o quando a linha sofre expansão térmica e estendendo-o de acordo com a diminuição da temperatura do mesmo. A Figura 3.2 ilustra a montagem *SLiM*.

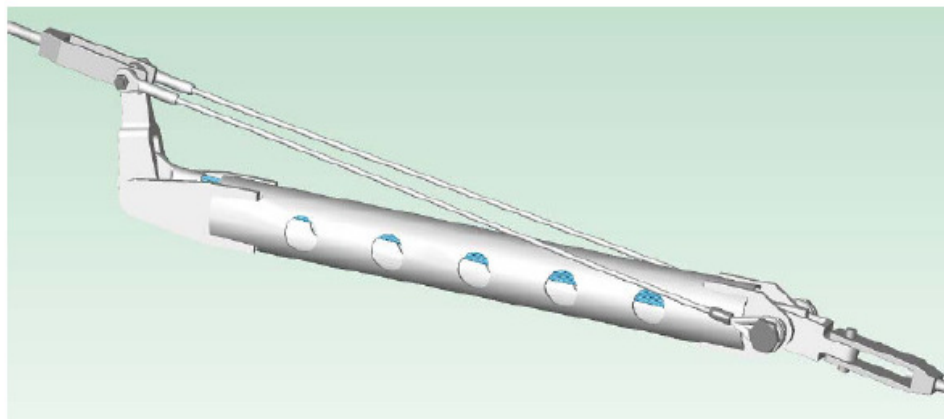


Figura 3.2 – SLiM - Sagging Line Mitigator (Shirmohamadi, 2002).

A força de atuação do *SLiM* resulta da transformação martensítica que ocorre no SMA no interior do dispositivo. Os mecanismos de transformação e detalhes do efeito de memória de forma são apresentados no Capítulo 2. Quando o *SLiM* é instalado em linha (Fig. 3.3), parte da corrente é transferida ao atuador de SMA, enquanto que o restante da corrente é conduzida pela carcaça metálica do dispositivo.

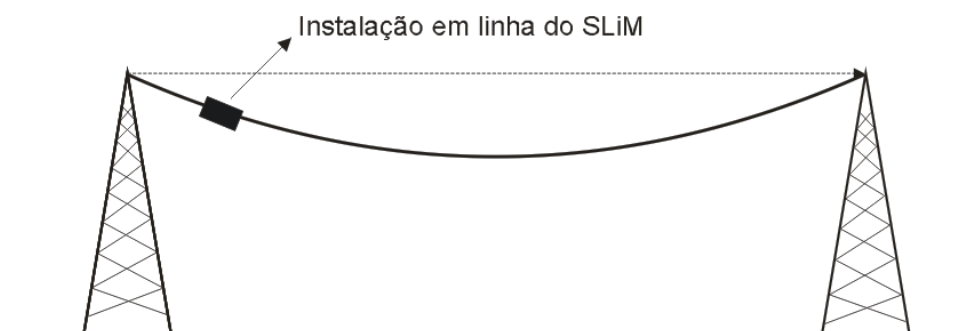


Figura 3.3 – Instalação do SLiM.

O fluxo da corrente elétrica causa um aumento de temperatura do SMA, suficiente para que o mesmo sofra uma transformação martensítica e se contraia. Essa contração é amplificada através do

braço de alavanca, que por sua vez traciona o cabo condutor, diminuindo o comprimento e conseqüentemente a flecha, Fig. (3.4).

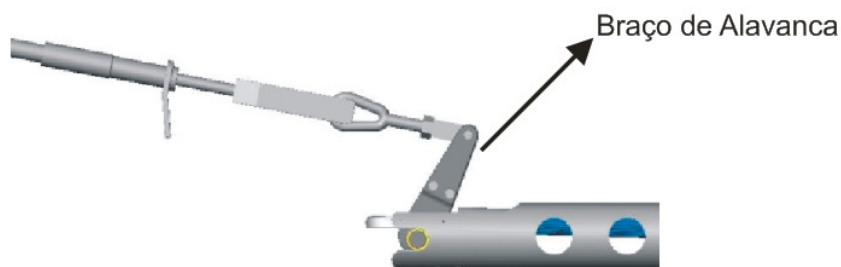


Figura 3.4 – Contração do atuador, tracionando o cabo condutor (Shirmohamadi, 2002).

Com a diminuição da temperatura do **SMA**, o dispositivo irá se estender, diminuindo a tensão no cabo condutor.

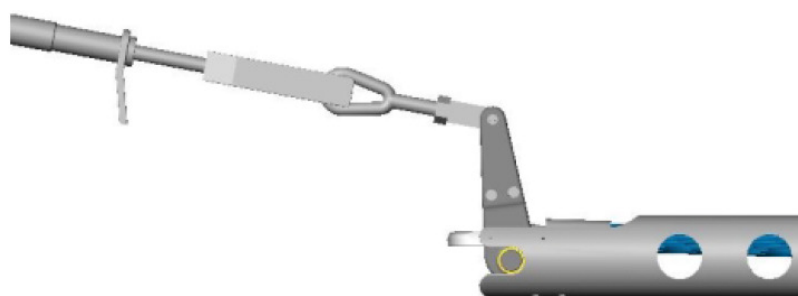


Figura 3.5 – Atuador estendido, diminuindo a tração no cabo condutor (Shirmohamadi, 2002).

3.2 ESTUDO DE CASO

Para analisar a eficiência do SLiM instalado em LT's, foi realizado um estudo de caso no seguinte contexto:

- Considerando um vão de 400 m entre duas torres;
- As tensões nas quais cada torre exerce sobre o condutor possuem o mesmo valor;
- O parâmetro de catenária ($C = T_0 / p$) que avalia o nível de tração no condutor e o peso na linha possui o valor de 1800m para a temperatura de $15^{\circ}C$;
- O condutor ao atingir a temperatura de $50^{\circ}C$, a distância entre o cabo e o solo estará no limite permitido pela norma de segurança;
- O SLiM promove uma redução de 200mm no comprimento do condutor.

O modelo parabólico (Eq. 2.9) foi usado para determinar como a redução de 200mm no comprimento do condutor promovida pelo SLiM afeta a diminuição da flecha para uma temperatura de operação de $70^{\circ}C$.

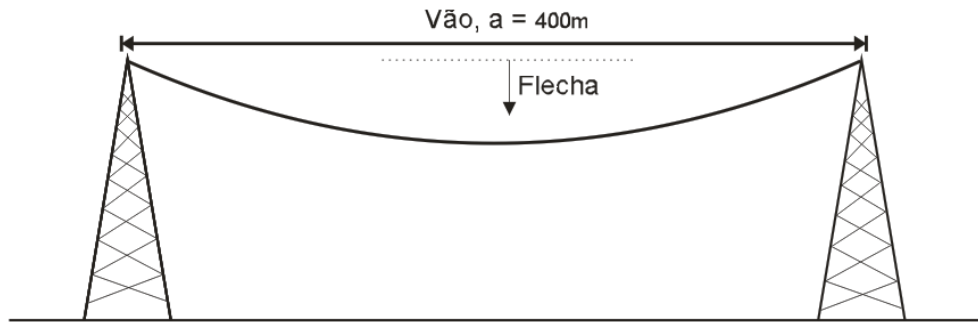


Figura 3.6 – Esquema da flecha em um vão de 400m.

A flecha, em termos da geometria do vão, pode ser calculada da seguinte maneira:

$$f = \frac{a^2}{8C} = 11,11m, \quad (3.1)$$

onde:

$$a = 400m;$$

$$C = 1800m;$$

O comprimento, L , do condutor é calculado pela Eq. (3.2), desenvolvida em função da flecha e do seu vão:

$$L = a + \frac{8f^2}{3a}, \quad (3.2)$$

$$L = 400,82m. \quad (3.3)$$

Quando o condutor atingir a temperatura de $50^{\circ}C$ sofre uma expansão linear, adquirindo um comprimento maior. O novo comprimento causa um aumento de flecha. A flecha formada nessas condições de geometria e de temperatura foi considerada a máxima permitida para que as distâncias de segurança não sejam violadas. Assim, $50^{\circ}C$ é a máxima temperatura de operação admissível para que a flecha não viole a norma de segurança.

Com isso, o novo comprimento do condutor devido à expansão térmica é calculado:

$$L_{50^{\circ}C} = L + [L \cdot \alpha \cdot (T - T_0)], \quad (3.4)$$

$$L_{50^{\circ}C} = 400,82 + \left[400,82 \cdot 18,43 \times 10^{-6} \cdot (50 - 15) \right], \quad (3.5)$$

$$L_{50^{\circ}C} = 401,08m, \quad (3.6)$$

onde α é o coeficiente de expansão térmica linear do condutor = $18,43 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{^{\circ}C} \right)$.

Então, a máxima flecha aceita para essas condições é:

$$f_{50^{\circ}C} = \sqrt{3 \cdot a \left(\frac{L_{50^{\circ}C} - a}{8} \right)}, \quad (3.7)$$

$$f_{50^{\circ}C} = \sqrt{3 \cdot 400 \left(\frac{401,08 - 400}{8} \right)}, \quad (3.8)$$

$$f_{50^{\circ}C} = 12,73m. \quad (3.9)$$

Quanto maior for a demanda de potência, o condutor irá aquecer cada vez mais. Assumindo que o condutor alcance a temperatura de $70^{\circ}C$, a flecha formada irá ultrapassar a distância de segurança. O comprimento do condutor é calculado ao atingir a temperatura de $70^{\circ}C$:

$$L_{70^{\circ}C} = L + \left[L \cdot \alpha \cdot (T - T_0) \right], \quad (3.10)$$

$$L_{70^{\circ}C} = 400,82 + \left[400,82 \cdot 18,43 \times 10^{-6} \cdot (70 - 15) \right], \quad (3.11)$$

$$L_{70^{\circ}C} = 401,23m. \quad (3.12)$$

A flecha para o comprimento de $L_{70^{\circ}C}$ é:

$$f_{70^{\circ}C} = \sqrt{3 \cdot a \left(\frac{L_{70^{\circ}C} - a}{8} \right)}, \quad (3.13)$$

$$f_{70^{\circ}C} = \sqrt{3 \cdot 400 \left(\frac{401,23 - 400}{8} \right)}, \quad (3.14)$$

$$f_{70^{\circ}C} = 13,58. \quad (3.15)$$

Então, quando o condutor é conduzido a uma temperatura de 70°C , a flecha ultrapassa em $0,85m$ o máximo permitido:

$$f_{\text{violação}} = f_{70^{\circ}\text{C}} - f_{50^{\circ}\text{C}}, \quad (3.16)$$

$$f_{\text{violação}} = 13,58 - 12,73(m), \quad (3.17)$$

$$f_{\text{violação}} = 0,85m. \quad (3.18)$$

Para avaliar a ação do SLiM é necessário agora calcular a variação de comprimento do condutor quando a temperatura supera determinado valor. Para isso, utilizou-se o modelo de Brinson para calcular a deformação que o SMA sofrerá (ϵ_{SMA}) quando submetido ao peso do cabo a $T = 50^{\circ}\text{C}$ e consequentemente o comprimento do cabo nesta temperatura com o SLiM. Depois, o atuador é submetido a uma história de temperatura de 50 a 70°C passando pela temperatura A_f do atuador. Com isso, o SMA se contrai em $\Delta L_{\text{SMA}} = L_{\text{SMA}} \cdot \epsilon_{\text{SMA}}$ e reduz o comprimento do cabo em uma distância ΔL_{SLiM} . Por fim, a partir da relação entre ΔL_{SMA} e ΔL_{SLiM} obtém-se a redução do comprimento do cabo $\Delta L_{\text{Cabo}} = \Delta L_{\text{SLiM}}$ sob a ação do SLiM a 70°C . Essa redução é subtraída do comprimento do cabo a 70°C sem o SLiM e a nova flecha é calculada. A Figura (3.7) apresenta a variação da deformação do SMA (ϵ_{SMA}) fornecida pelo modelo Brinson em função da temperatura. Para essa análise foram considerados os seguintes dados:

$$\epsilon_{\text{SMA}} = 0,067;$$

$$L_{\text{SMA}} = 1.000 \text{ mm};$$

$$\text{Fator de Ampliação} = 2,985.$$

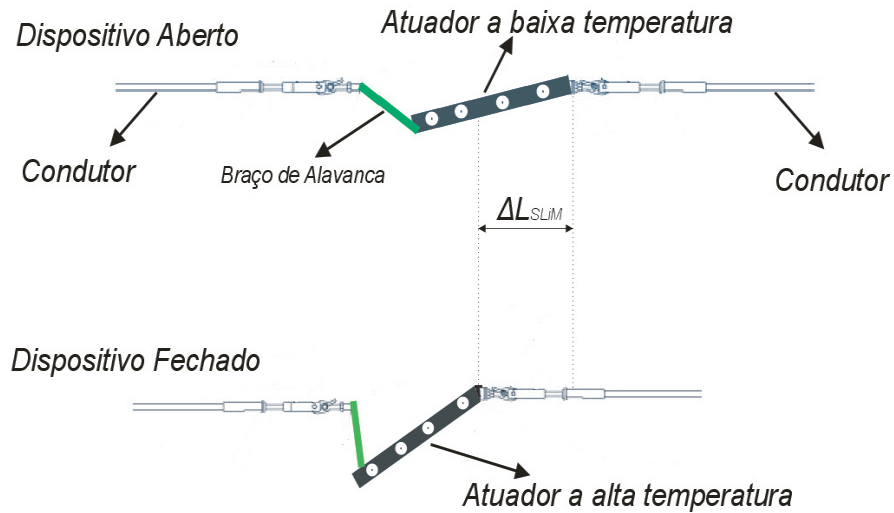


Figura 3.7 – Mecanismo SLiM – Esquemático.

Logo $\Delta L_{SMA} = 0,067 \times 1000 \text{ mm} = 67\text{mm}$ e $\Delta L_{SLiM} = 67\text{mm} \times 2,985 = 200 \text{ mm}$.

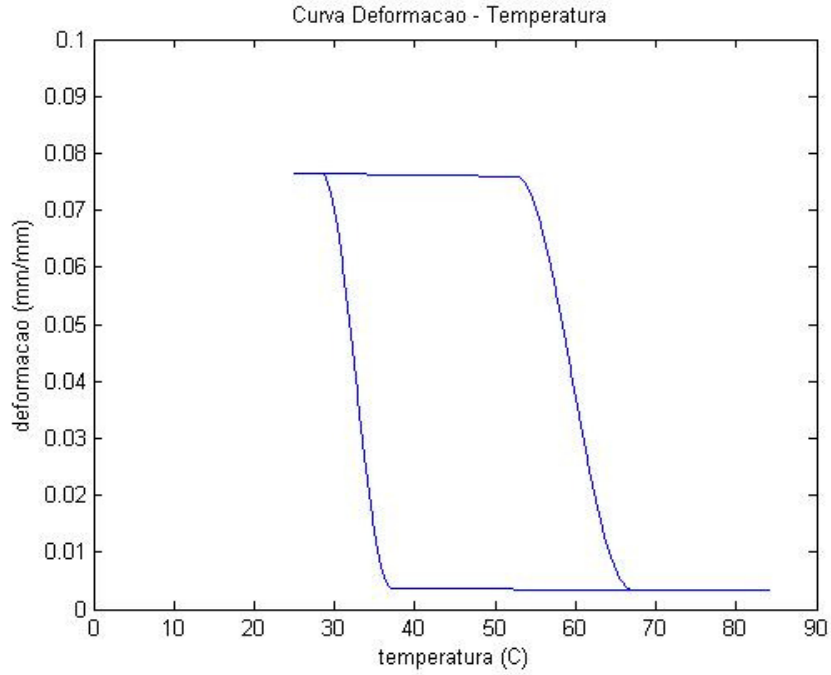


Figura 3.8 – Curva Deformação x Temperatura do atuador com memória de forma (ϵ_{SMA}).

Portanto, a ação do SLiM reduz o comprimento do condutor em 200mm, quando o este atinge a temperatura de 70°C. Assim tem-se:

$$L_{SLiM 70^{\circ}C} = L_{70^{\circ}C} - 0,2m, \quad (3.19)$$

$$L_{SLiM 70^{\circ}C} = 401,23 - 0,2m, \quad (3.20)$$

$$L_{SLiM 70^{\circ}C} = 401,03m. \quad (3.21)$$

A nova flecha com a atuação do SLiM é:

$$f_{SLiM 70^{\circ}C} = \sqrt{3 \cdot a \left(\frac{L_{SLiM 70^{\circ}C} - a}{8} \right)}, \quad (3.22)$$

$$f_{SLiM 70^{\circ}C} = \sqrt{3 \cdot 400 \left(\frac{401,03 - 400}{8} \right)}, \quad (3.23)$$

$$f_{SLiM 70^{\circ}C} = 12,43m. \quad (3.24)$$

Portanto, com a instalação do SLiM na LT, a flecha do condutor que era de 13,58 m diminui para 12,43 m (redução de 8,5%), permitindo assim que a LT opere a uma temperatura mais alta, transmitindo maior potência sem ultrapassar o limite de segurança.

$$f_{SLiM\ 70^0C} < f_{50^0C}, \quad (3.25)$$

$$\frac{f_{SLiM\ 70^0C} - f_{50^0C}}{f_{SLiM\ 70^0C}} = 8,5\%. \quad (3.26)$$

3.3 MODELAGEM DA VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO EFETIVO DO SLIM

Para aprofundar a análise do SLIM (Fig. 3.9) primeiramente é necessário modelá-lo matematicamente. E para isso, será preciso representá-lo de forma simplificada.

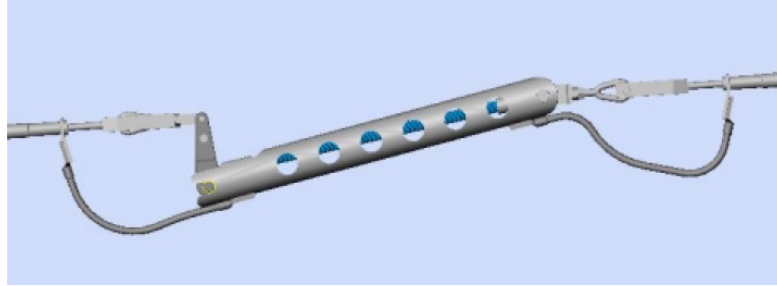


Figura 3.9 – Vista frontal do SLIM.

O método usado para descrever o dispositivo de forma simplificada foi fechar um triângulo entre os pontos de tração do SLIM (pontos A e B) e o ponto de articulação do braço de alavanca (ponto O).

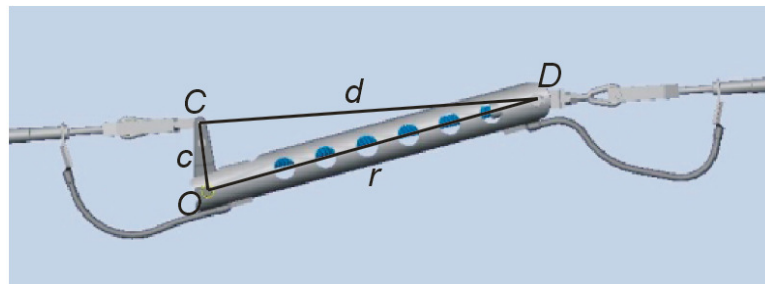


Figura 3.10 – Representação simplificada do SLIM.

onde c é o comprimento do braço de alavanca, d é a distância entre os pontos C e D e r é o comprimento dos fios de SMA no interior do dispositivo, Fig. (3.11).

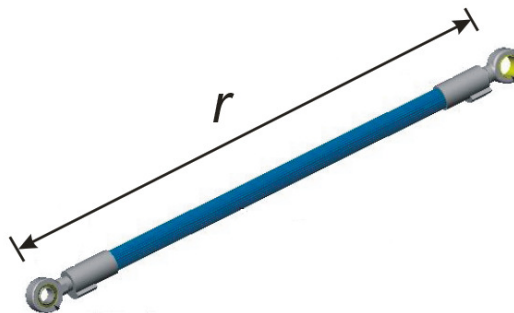


Figura 3.11 – Conjunto de fios de SMA.

Representando o triângulo formado no plano cartesiano, tem-se a seguinte construção como mostra a Fig. (3.12).

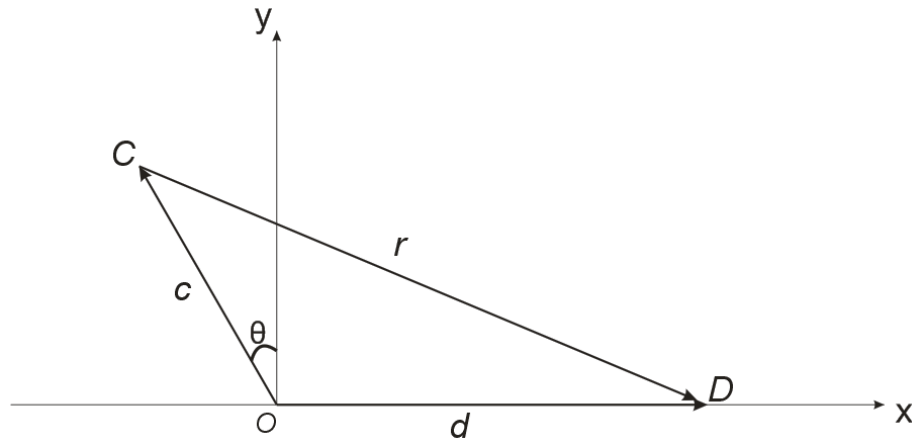


Figura 3.12 – Modelagem do SLIM.

Um vetor posição r é definido como um vetor fixo que localiza um ponto do espaço em relação a outro ponto. Esse vetor é orientado de ponto C para o ponto D no espaço.

Como indicado, esse vetor é designado r , que pode ser expresso na forma de vetor cartesiano como:

$$\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j}. \quad (3.27)$$

Com isso, são definidos os vetores posição dos pontos C e D :

$$\vec{c} = x_c\hat{i} + y_c\hat{j} = -c \cdot \sin(\theta)\hat{i} + c \cdot \cos(\theta)\hat{j}, \quad (3.28)$$

$$\vec{d} = x_d\hat{i} + y_d\hat{j} = d\hat{i} + 0\hat{j}. \quad (3.29)$$

Pela adição de vetores, é necessário que:

$$\vec{r} = \vec{d} - \vec{c}. \quad (3.30)$$

Assim:

$$\vec{r} = (x_d - x_c)\hat{i} + (y_d - y_c)\hat{j} = (d + c \cdot \sin(\theta))\hat{i} - (c \cdot \cos(\theta))\hat{j}. \quad (3.31)$$

Com as coordenadas do vetor r definidas, calcula-se o seu módulo:

$$\|\vec{r}\| = \left[(d + c \cdot \sin(\theta))^2 + (-c \cdot \cos(\theta))^2 \right]^{1/2}, \quad (3.32)$$

$$\|\vec{r}\| = \left[\left(d^2 + 2dc \cdot \sin(\theta) + c^2 \sin^2(\theta) \right) + \left(c^2 \cdot \cos^2(\theta) \right) \right]^{1/2}, \quad (3.33)$$

$$\|\vec{r}\| = \left[\left(d^2 + 2dc \cdot \sin(\theta) + c^2 (\sin^2(\theta) + \cos^2(\theta)) \right) \right]^{1/2}, \quad (3.34)$$

$$\|\vec{r}\| = \left[\left(d^2 + 2dc \cdot \sin(\theta) + c^2 \right) \right]^{1/2}. \quad (3.35)$$

Com o módulo de um vetor r genérico em mãos, o interesse dessa seção é calcular $\Delta SLIM$. Para isso, será utilizada a Eq. (3.35).

Ao instalar o SLIM na LT o conjunto de fios de SMA no interior da carcaça sofrerá deformação quasiplástica devido à tensão causada pelo peso próprio do cabo. Inicialmente todo o conjunto estará na condição fria a uma temperatura abaixo de M_f . Temperatura na qual o SLIM estará na configuração aberta, ver Fig. (3.13).

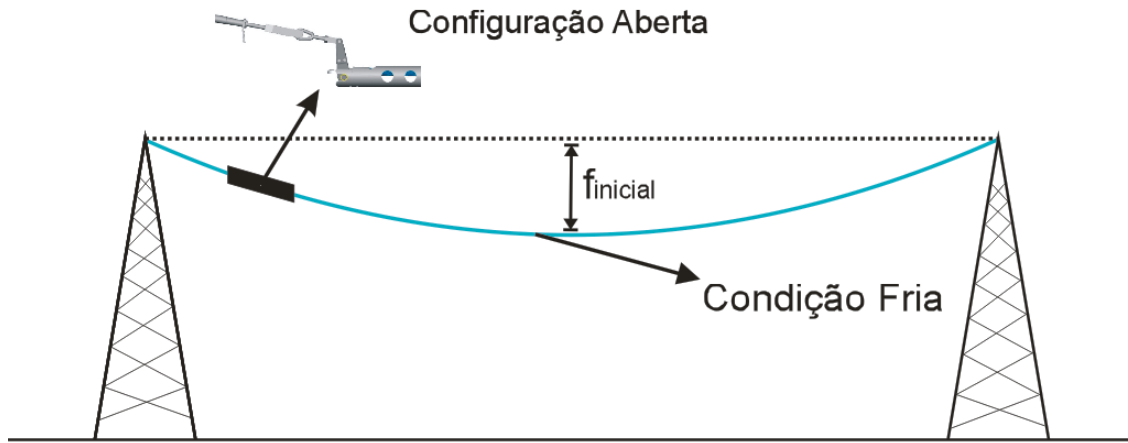


Figura 3.13 – Configuração aberta do SLIM na condição fria.

Com o aumento da temperatura a flecha aumentará até a temperatura A_s , atingindo o seu valor máximo. O aquecimento acima de A_s induz a transformação reversa (Martensita \rightarrow Austenita) no SMA e, conseqüentemente, a recuperação da deformação quasiplástica. O dispositivo inicia a contração até atingir a temperatura A_f (temperatura na qual o SMA é totalmente constituído por austenita) assumindo a configuração fechada, como mostra a Fig. (3.14).

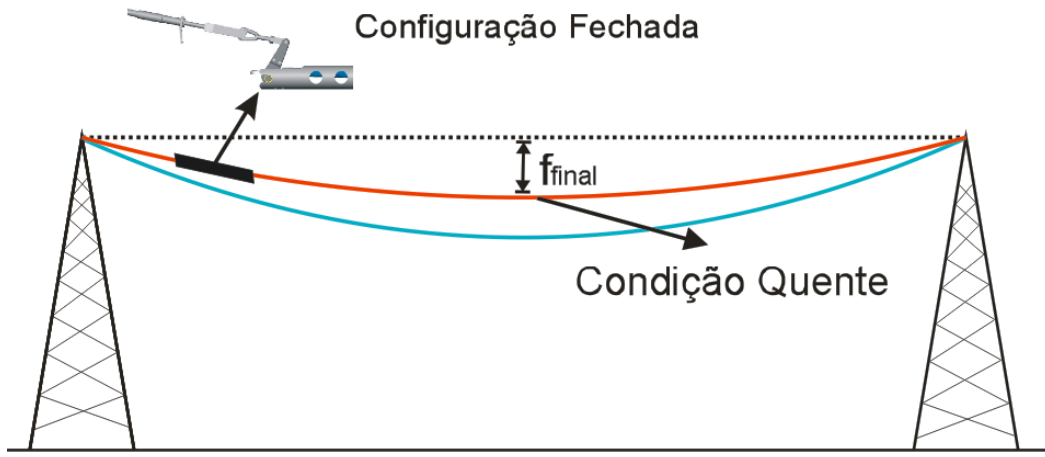


Figura 3.14 – Configuração fechada do SLIM na condição quente.

A Fig. (3.15) apresenta a variação de configuração do SLIM, partindo de um estado fio (configuração fechada) no ponto C onde o comprimento do SMA é L_F e que termina no estado quente (configuração fechada) no ponto C' onde o comprimento do SMA é L_Q . De fato, a contração do SMA (de L_F para L_Q) devido ao aquecimento é traduzida em uma mudança de inclinação do ponto C e conseqüentemente do ângulo θ do braço de alavanca.

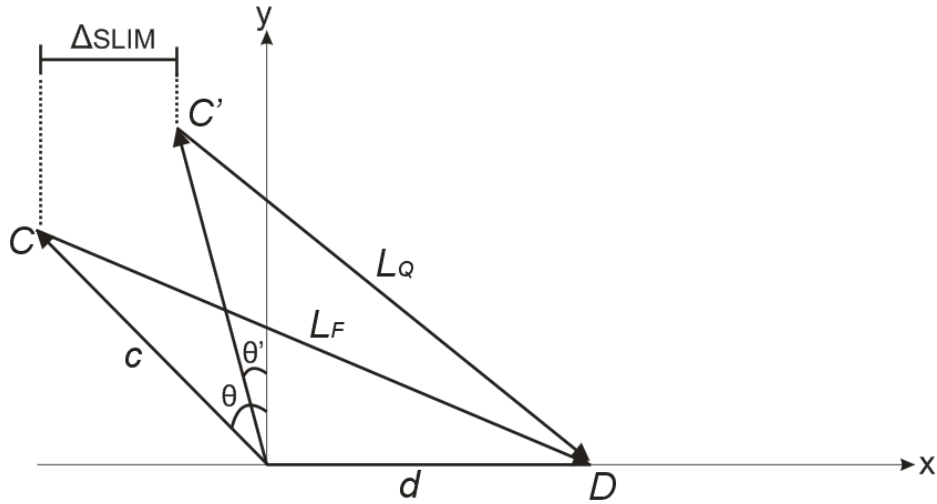


Figura 3.15 – Representação da variação de comprimento do SLIM devido à variação de θ no segundo quadrante.

Assim, $\Delta SLIM$ pode ser descrito em função do comprimento da alavanca c e pelos ângulos θ e θ' :

$$\Delta SLIM = c \cdot \text{sen}(\theta) - c \cdot \text{sen}(\theta'), \quad (3.36)$$

$$\Delta SLIM = c [\text{sen}(\theta) - \text{sen}(\theta')]. \quad (3.37)$$

Os ângulos θ e θ' podem ser descritos por parâmetros geométricos ilustrados na Fig.(3.15).
A partir da Eq. (3.35), tem-se:

$$\|L_F\| = \left[\left(d^2 + 2dc \cdot \text{sen}(\theta) + c^2 \right) \right]^{1/2}, \quad (3.38)$$

$$\text{sen}(\theta) = \frac{(L_F^2 - c^2 - d^2)}{(2dc)}. \quad (3.39)$$

Fazendo-se o mesmo para θ' :

$$\|L_Q\| = \left[\left(d^2 + 2dc \cdot \text{sen}(\theta') + c^2 \right) \right]^{1/2}, \quad (3.40)$$

$$\text{sen}(\theta') = \frac{(L_Q^2 - c^2 - d^2)}{(2dc)}. \quad (3.41)$$

Voltando à Equação (3.37):

$$\Delta SLIM = c [\text{sen}(\theta) - \text{sen}(\theta')], \quad (3.42)$$

$$\Delta SLIM = c \left[\frac{(L_F^2 - c^2 - d^2)}{(2dc)} - \frac{(L_Q^2 - c^2 - d^2)}{(2dc)} \right], \quad (3.43)$$

$$\Delta SLIM = c \left[\frac{(L_F^2 - c^2 - d^2 - L_Q^2 + c^2 + d^2)}{(2dc)} \right], \quad (3.44)$$

$$\Delta SLIM = \frac{(L_F^2 - L_Q^2)}{(2d)}. \quad (3.45)$$

As equações descritas até agora valem para θ variando dentro do segundo quadrante, como mostra a Fig. (3.16).

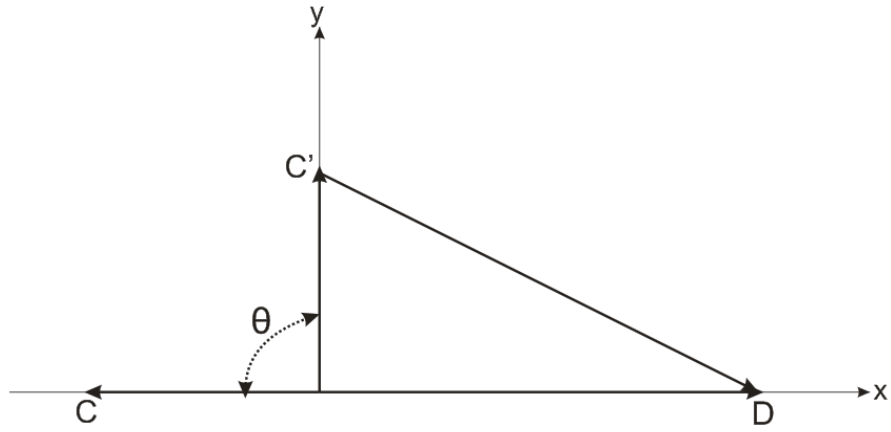


Figura 3.16 – Representação da variação de θ no segundo quadrante.

Assim, os mesmos procedimentos para encontrar a Eq. (3.45) serão adotados para encontrar o conjunto de equações que descreve a variação do comprimento do SLIM para um dado θ que parte do segundo quadrante e que finalize no primeiro, representada na Fig. (3.17).

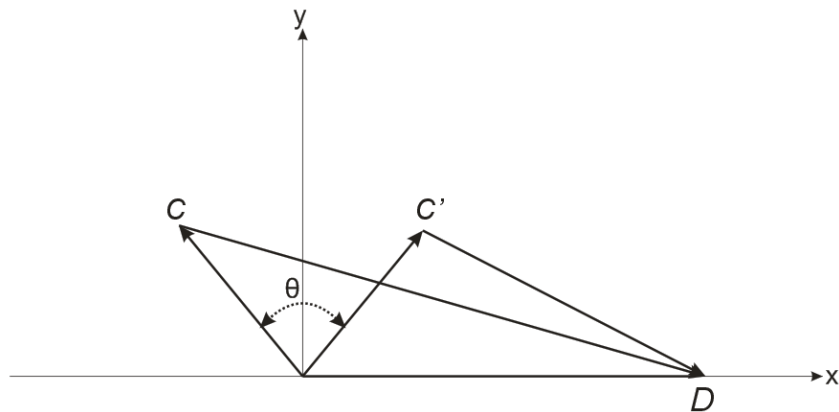


Figura 3.17 – Representação da variação de θ partindo do segundo quadrante e finalizando no primeiro.

Novamente, tem-se a representação simplificada da variação de comprimento sofrida pelo SLIM, agora para uma maior deformação do SMA, onde $\Delta SLIM$ possui uma extensão maior comparada à modelagem de θ variando somente no segundo quadrante, ver Fig. (3.18).

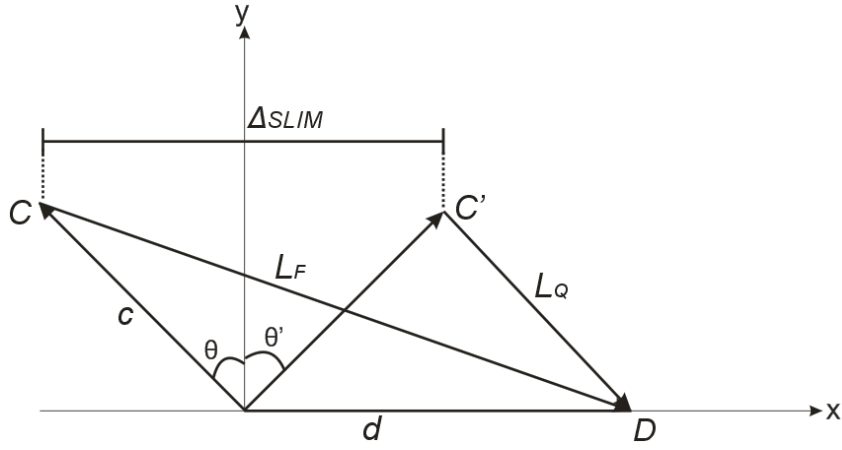


Figura 3.18 – Representação da variação de comprimento do SLIM devido à variação de θ no primeiro e no segundo quadrante.

Tem-se o vetor L_Q :

$$\vec{L}_Q = (d - c \cdot \text{sen}(\theta'))\hat{i} - (c \cdot \cos(\theta'))\hat{j}. \quad (3.46)$$

O módulo do vetor L_Q é:

$$\|\vec{L}_Q\|^2 = (c^2 - 2dc \cdot \text{sen}(\theta') + c^2 \cdot \text{sen}(\theta')^2 + c^2 \cdot \cos(\theta')^2), \quad (3.47)$$

$$\|\vec{L}_Q\|^2 = (d^2 - 2dc \cdot \text{sen}(\theta') + c^2 (\text{sen}(\theta')^2 + \cos(\theta')^2)), \quad (3.48)$$

$$\|\vec{L}_Q\|^2 = (d^2 - 2dc \cdot \text{sen}(\theta') + c^2), \quad (3.49)$$

$$\text{sen}(\theta') = \frac{(L_Q^2 - c^2 - d^2)}{(2dc)}. \quad (3.50)$$

Com isso, a partir da Fig. (3.18) tem-se que:

$$\Delta SLIM = c(\text{sen}(\theta) + \text{sen}(\theta')). \quad (3.51)$$

Então, utilizando as Equações (3.39) e (3.50):

$$\Delta SLIM = \frac{(L_F^2 - L_Q^2)}{2d}. \quad (3.52)$$

3.4 ACOPLAMENTO DA VARIAÇÃO DE COMPRIMENTO EFETIVO DO SLIM COM A DEFORMAÇÃO DO SMA

A Figura (3.19) ilustra a deformação de um fio de SMA devido a uma variação de temperatura. Assume-se que o material no estado frio L_F esteja deformado quasiplasticamente, condição na qual há uma pré-carga devido ao peso próprio do cabo atuante sobre o mesmo e que o estado L_Q corresponda ao estado quente, no qual foi recuperada a deformação quasiplástica.

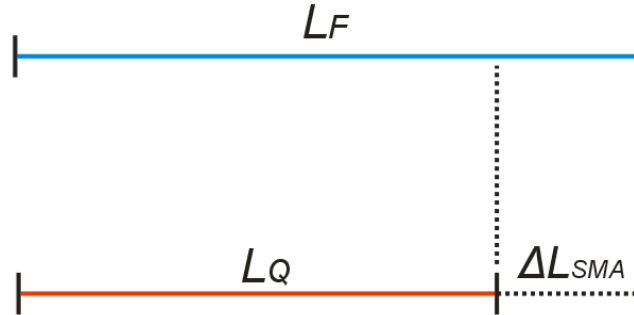


Figura 3.19 – Deformação de um fio de SMA devido à variação de temperatura.

A deformação sofrida pelo SMA é:

$$\varepsilon_{SMA} = \frac{\Delta L_{SMA}}{L_F}. \quad (3.53)$$

Onde:

$$\Delta L_{SMA} = L_F - L_Q. \quad (3.54)$$

Assim:

$$\varepsilon_{SMA} = \frac{L_F - L_Q}{L_F}. \quad (3.55)$$

Isolando-se L_Q :

$$L_Q = L_F (1 - \varepsilon_{SMA}). \quad (3.56)$$

Como o objetivo é descrever $\Delta SLIM$ em função da deformação do SMA, tem-se da Eq. (3.52):

$$\Delta SLIM = \frac{(L_F^2 - L_Q^2)}{(2d)}. \quad (3.57)$$

Utilizando a Eq. (3.56):

$$\Delta SLIM = \frac{(L_F^2 - (L_F(1 - \varepsilon_{SMA}))^2)}{(2d)}, \quad (3.58)$$

$$\Delta SLIM = -L_F^2 \frac{(-2\varepsilon_{SMA} + \varepsilon_{SMA}^2)}{(2d)}. \quad (3.59)$$

Com o objetivo de analisar o comportamento da variação de comprimento efetivo do SLIM em função da deformação do SMA, foi realizada simulação numérica da Eq. (3.59) juntamente com o Modelo de Brinson que fornece a deformação sofrida pelo SMA para um dado aquecimento. A Fig. (3.20) apresenta o resultado dessa simulação, onde a linha vermelha representa o aquecimento e a azul o resfriamento.

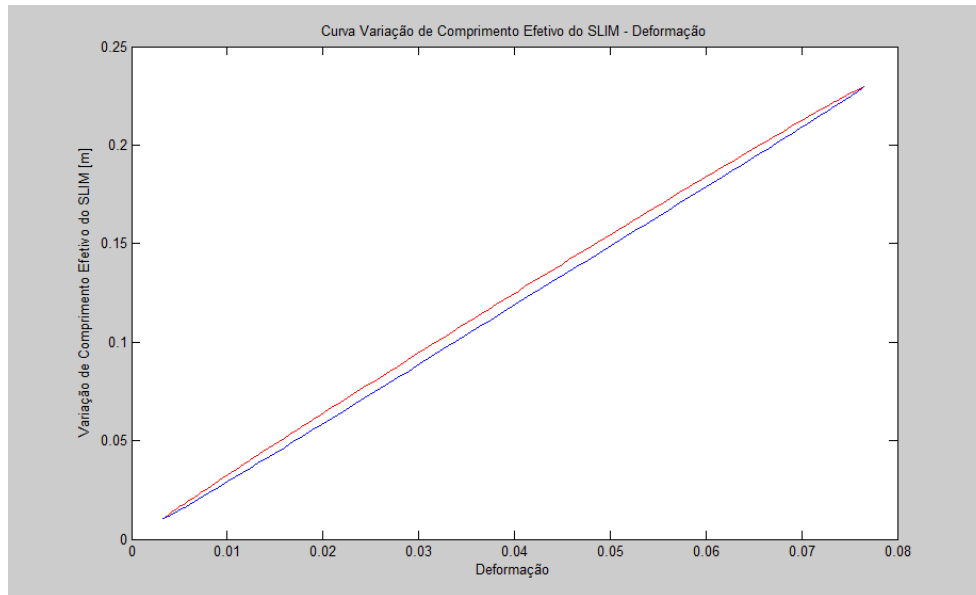


Figura 3.20 – Curva variação do comprimento efetivo do SLIM pela deformação do SMA.

3.5 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA FLECHA

Nessa seção é apresentado o modelo que descreve o comportamento da flecha com a temperatura. Para isso é necessário saber quais são os parâmetros que influenciam a flecha formada pelos cabos. A flecha pode ser determinada pela Eq. (3.60), como já foi visto na seção 2.3.3:

$$f = \sqrt{3 \cdot a \left(\frac{L^{cabo} - a}{8} \right)}, \quad (3.60)$$

onde a é o vão entre os suportes do cabo e L^{cabo} é o comprimento instantâneo do cabo. Assim, com o aumento de temperatura, o cabo sofre expansão linear aumentando o seu comprimento. Esse comportamento é descrito pela Eq. (3.61).

$$L_F^{cabo} = L_I^{cabo} + L_I^{cabo} \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (3.61)$$

onde L_F^{cabo} é o comprimento final (m) do cabo, L_I^{cabo} o seu comprimento inicial (m), α é o coeficiente de dilatação linear (K^{-1}) e ΔT é a variação de temperatura. Acoplando a equação da dilatação linear com a que descreve flecha, tem-se:

$$f = \sqrt{3 \cdot a \left(\frac{(L_I^{cabo} + L_I^{cabo} \cdot \alpha \cdot \Delta T) - a}{8} \right)}. \quad (3.62)$$

Assim, a flecha depende indiretamente da temperatura. A Eq. (3.62) é utilizada para descrever a flecha sem a atuação do SLIM. Para que o modelo contabilize a ação do SLIM é necessário adicionar o comprimento do SLIM, já que com o aumento de temperatura o comprimento efetivo do dispositivo diminuirá. Dessa maneira:

$$f = \sqrt{3 \cdot a \left(\frac{[(L_I^{cabo} + L_I^{cabo} \cdot \alpha \cdot \Delta T) + \Delta SLIM] - a}{8} \right)}. \quad (3.63)$$

Acoplando a Eq. (3.63) e a (3.59):

$$f = \sqrt{3 \cdot a \left(\frac{\left[(L_I^{cabo} + L_I^{cabo} \cdot \alpha \cdot \Delta T) - \left(L_F^2 \frac{(-2\varepsilon_{SMA} + \varepsilon_{SMA}^2)}{(2b)} \right) \right] - a}{8} \right)}. \quad (3.64)$$

Para que se possa fazer a análise do comportamento da flecha, foram utilizadas as Eq. (3.63) e (3.64) na simulação numérica. A Eq. (3.63) foi empregada para descrever a variação da flecha pelo $\Delta SLIM$ (Fig. 3.21) e a Eq. (3.64) para descrever a flecha em função da temperatura (Fig. 3.22).

Na Fig. (3.21) a simulação inicia no ponto *I* a uma temperatura de $25^\circ C$ (SMA 100% martensítico) onde a flecha é $7,2m$, com o aquecimento, a flecha atinge o valor máximo de $9,1m$ no ponto *J* a $35^\circ C$ temperatura na qual inicia a formação de austenita ($T = A_s$) e a contração do SMA. Ao atingir o ponto *K* a $49^\circ C$ ($T = A_f$) o SMA é constituído 100% por austenita, situação de contração máxima do SMA onde a flecha é aproximadamente $8,1m$. Com o aumento contínuo da temperatura a flecha novamente aumenta alcançando o valor máximo de $9,1m$ no ponto *L* ($T = 85^\circ C$), ponto no qual finaliza o aquecimento e se inicia o resfriamento. Ao atingir o ponto *M* a

$18,4^{\circ}\text{C}$ ($T = M_s$), temperatura de início de formação de martensita, o SMA inicia a sua dilatação que perdura até ponto I a 9°C ($T = M_F$), quando o SMA é 100% constituído por martensita.

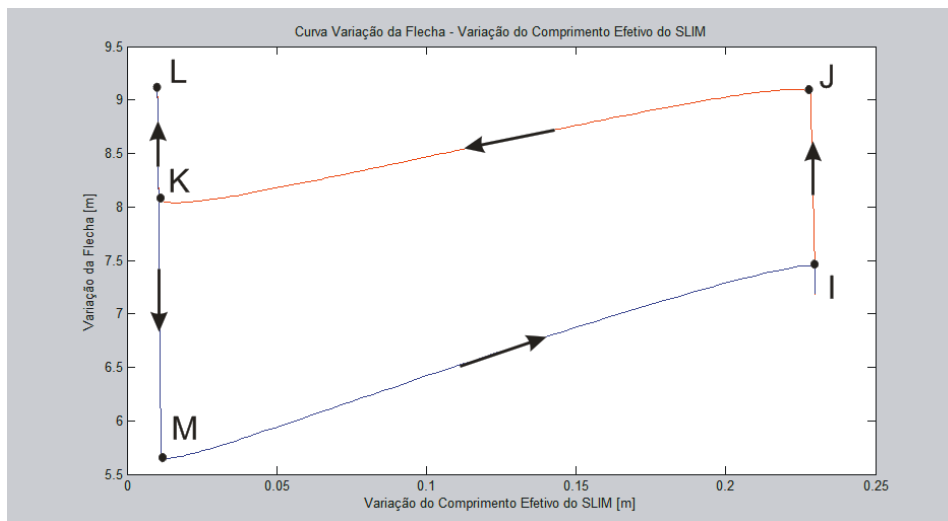


Figura 3.21 – Curva variação da flecha pelo $\Delta SLIM$.

Na Fig. (3.22) os mesmos pontos são plotados nas temperaturas correspondentes e o ciclo exposto acima pode ser visto. A reta pontilhada mostra o comportamento da flecha sem o SLIM. É notável a redução da flecha ao comparar a flecha com e sem o SLIM. De fato, com a modelagem implementada é possível realizar um estudo que maximize a redução da flecha modificando os parâmetros geométricos.

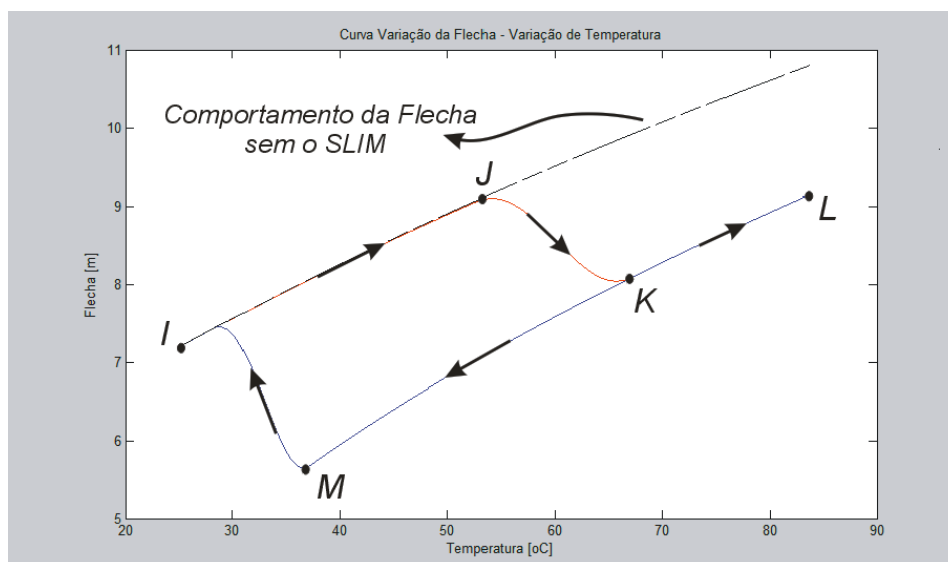


Figura 3.22 – Curva variação da flecha pela temperatura.

4 CONCLUSÕES

O presente projeto apresentou uma análise do mitigador de catenária (SLiM) desenvolvido pela empresa americana *Material Integrity Solutions Inc.* O SLiM é um atuador baseado no comportamento termomecânico das ligas com memória de forma capaz de retracionar o cabo condutor de uma linha de transmissão de energia elétrica quando essa sofre uma determinada variação de temperatura. Assim, ele se propõe a eliminar a flecha excessiva em vãos onde há a ocorrência de flechas que levam o condutor a infringir a distância de segurança pré-estabelecida.

A análise consistiu do cálculo do comprimento de um cabo a 50°C e a 70°C sob e sem a ação do SLiM. Para isso, fez-se uso de um modelo para ligas com memória de forma – modelo de Brinson – para prever a deformação que o elemento com SMA do SLiM sofre sob a ação do peso do cabo e a variação de temperatura entre 50 e 70°C. Conjuntamente com equações clássicas do projeto de linhas de transmissão de energia elétrica calculou-se o comprimento do cabo e a flecha para cada temperatura sem e com a ação do SLiM. Verificou-se que sem a ação do SLiM a variação da temperatura de 50 para 70°C gera um aumento da flecha em 0,85 m (6,7 %). Sob a ação do SLiM e a mesma variação de temperatura, a flecha é reduzida em 1,15m (8,5%).

Finalmente, foi realizada a modelagem do SLiM com o objetivo de aprofundar a sua análise. A simulação do modelo chegou a resultados relevantes, sobretudo para a compreensão do comportamento da flecha em função da variação do comprimento efetivo do SLiM e da temperatura. Essa análise reforça o conceito inicial do projeto de reduzir a flecha de forma eficiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “**NBR 5422: Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica**”. Rio de Janeiro, 1985.
- ARAÚJO, M.R., “**Simulação do Comportamento de um SMA Através do Modelo de Brinson**”, PIBIC/CNpq, Departamento de Engenharia Mecânica, UnB, DF, 2002.
- BATRA, A., “**Shape Memory Alloys An Introduction**”. Seminar Report, Roll No 97D01002, Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Technology, Bombay, 1999.
- BRINSON, L.C., “**One Dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys: Thermomechanical Derivation With Non-Constant Material Functions**”. J. Intell. Syst., p. 229-242, 1993.
- BURIN, F.S., “**Modelagem do Comportamento Mecânico de Cabos suspensos Através de Métodos Analíticos e Numéricos**”, Trabalho de Diplomação, Departamento de Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 74p. 2010.
- CASTILHO, W.S., “**Caracterização Termomecânica de Compósitos Híbridos com Memória de Forma**”, Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM-DM-nº19, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, DF, 100p. 2008.
- DA SILVA, E.P., “**Aplicações de ligas com memória de forma em estruturas adaptativas**”. Série Arquimedes, Vol.2, Anais de DINCON 2003, pp. 2358-2387. Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, São José dos Campos, SP, 2003.
- DELAEY, L., KRISHNAN, R. V., WARLIMONT, H., “**Thermoelasticity, Pseudoelasticity and Memory Effects Associated With Martensitic Transformations. Part 1: Structural and Microstructural Changes Associated With the Transformations**”. Journal of Materials Science, 9 (1975), pp. 1521-1535.
- DYE, T. E., “**An Experimental Inverigation of the Behavior of Nitinol**”. MS thesis, Virginia Tech, 1990.
- FUCHS, R.D., ALMEIDA, M.T, “**Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**”, Ed. Edgard Blücher, S.Paulo, Brasil, pp. 1-11., 1982.
- FUNAKUBO, H., “**Shape Memory Alloys**”. Gordon & Bleach. New York, 1987.
- GOLDEMBERG, J., LUCON, O., “**Energia e Meio Ambiente no Brasil**”, Revista Estudos Avançados 59 – Dossiê Energia, S.Paulo, Brasil, pp. 1-14, 2006.
- KRISHNAN, R. V., DELAEY, L., TAS, H., “**Thermoelasticity, Pseudoelasticity and Memory Effects Associated With Martensitic Transformations. Part 2: The Macroscopic Mechanical Behaviour**”. Journal of Materials Science, 9 (1975), pp. 1536-1544.
- LAGUDAS, D.C., “**Shape Memory Alloys – Modeling and Engineering Applications**”, Springer, Texas, USA, 446p. 2007.
- LIANG, C., “**The Constitutive Modeling of Shape Memory Alloys**”. Ph.D. thesis, Virginia Tech, 1990.

- LÜSSI, K.M., **"A Study and Implementation Analysis of An Anti-Sagging Device for Power Transmission Lines Using Shape Memory Alloys"**, Dissertação de Mestrado, Department of Mechanical Engineering, University of KwaZulu-Natal, KwaZulu-Natal, South Africa, 147p. 2009.
- MONTEIRO, T., **"Apagões de Eficiência e de Tecnologias: Linhas de Transmissão"**, Disponível em: <http://telmadmonteiro.blogspot.com/2011/02/apagoes-de-eficiencia-e-tecnologias.html>, Dia do acesso 19/11/2011.
- NOVÁK, V., SITTNER, P., DAYANANDA, G. n, BRAZ-FERNANDES, F. M., MAKESH, K. K., **"Electric resistance variation of NiTi shape memory alloy wires in thermomechanical tests: Experiments and simulation"**, Material Science and Engineering A, Vol. 481-482, pp. 127-'33, 2008.
- OTSUKA, K., WAYMAN, C. M., **"Mechanism of Shape Memory Effect and Superelasticity"**. Cambridge University Press, Cambridge, 1998, p. 27-48.
- PAIVA, A., **"Modelagem do Comportamento Termomecânico das Ligas com Memória de Forma"**, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, 113p. 2004.
- PAIVA, A., PACHECO, P.M., SAVI, M.A., **"Modelos Constitutivos para Ligas com Memória de Forma"**. Série Arquimedes, Vol.2, Anais de DINCON 2003. Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, São José dos Campos, SP, 2003.
- PEREIRA JUNIOR, E. J., **"Uma formulação Consistente para Análise Não-Linear de Estruturas de Cabos Suspensos"**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, BH, 148p. 2002.
- SHIRMOHAMADI, M., **"Sagging Line Mitigator Final Report"**. California Energy Commission, Berkeley, CA, 2002.
- TALAVERA, L.M., **"Parábola e Catenária: História e Aplicações"**. Dissertação de Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática, Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, SP, 2008.
- TANAKA, K., **"A Thermomechanical Sketch of Shape Memory Effect: One-Dimensional Tensile Behaviour"**. Materials Science Research Internacional, v.18, pp. 251, 1985.
- WARLIMONT, H., **"Thermoelasticity, Pseudoelasticity and the Memory Effects Associated With Martensitic Transformations – Part 3: Thermodynamics and Kinetics"**. Journal of Materials Science, 9: pp. 1545-1555, 1974.

ANEXOS

	Pág.
Anexo I	
Implementação no Matlab do modelo de Brinson para a liga Níquel-Titânio	39
Anexo II	
Implementação no Matlab das equações utilizadas no estudo de caso	44

ANEXO I: Implementação do modelo de Brinson para NiTi

```
% Este programa é uma implementação do modelo de Brinson, em que uma
% tensão é
% aplicada até um valor constante uma e uma temperatura rampa é aplicada
% como entrada,
% com o intuito de verificar o comportamento da liga de memória de forma
% NiTi.

% Definição das constantes referentes à liga NiTi

clc
clear all
close all

Da = 67*10^3;
Dm = 26.3*10^3;
theta = 0.55;
Mf = 9;
Ms = 18.4;
As = 34.5;
Af = 49;
Cm = 8;
Ca = 13.8;
sigmas = 100;
sigmaf = 170;
El = 0.067;

% Definição das condições iniciais

E0 = 0;
es0 = 0;
eT0 = 0;
sigma0 = 0;
e0 = 0;
T = 25;
T0 = T;
T(1) = T;

% Parametros Geometricos do SLIM

b = 0.32;
Lf = 1.0; % Comprimento frio do SMA
a = 400; % vão
Lcabo = 400.1144; % Comprimento do cabo
alfa = 18.43*10^-6; % Coeficiente de Dilatação Térmica

% Escolha das variáveis de entrada

sigmamax = 250;
Tmax = 84;

% Cálculo de constantes utilizadas no programa

aM = pi/(Ms-Mf);
aA = pi/(Af-As);
deltaTe = 0;
```

```

% Aplicação da tensao ate´ o valor desejado

if Mf < T
    if T < Ms
        eT0 = (1-eT0)/2*(cos(aM*(T-Mf))+1);
        e0 = eT0;
    end
end
if T <= Mf
    eT0 = 1;
    e0 = eT0;
end
D0 = Da+e0*(Dm-Da);
omega0 = -El*D0;
for i = 1:600
    tempo(i) = 0.1*i;
    sigma(i) = sigmamax/60*tempo(i);

% Casos T >= Ms

    if T >= Ms
        if sigma(i) <= sigmas+Cm*(T-Ms)
            es(i) = es0;
            eT(i) = eT0;
            e(i) = e0;
        end
        if sigmas+Cm*(T-Ms) < sigma(i)
            if sigma(i) < sigmaf+Cm*(T-Ms)
                es(i) = (1-es0)/2*cos(pi/(sigmas-sigmaf)*(sigma(i)-sigmaf-
Cm*(T-Ms)))+(1+es0)/2;
                eT(i) = eT0-eT0*(es(i)-es0)/(1-es0);
                e(i) = es(i)+eT(i);
                cte1 = es(i);
                cte2 = eT(i);
                cte3 = e(i);
            end
        end
        if sigma(i) >= sigmaf+Cm*(T-Ms)
            es(i) = cte1;
            eT(i) = cte2;
            e(i) = cte3;
        end
    end

% Casos T < Ms

    if T < Ms

        if sigma(i) <= sigmas
            es(i) = es0;
            eT(i) = eT0;
            e(i) = e0;
        end
        if sigmas < sigma(i)
            if sigma(i) < sigmaf
                es(i) = (1-es0)/2*cos(pi*(sigma(i)-sigmaf)/(sigmas-
sigmaf)))+(1+es0)/2;
                if Mf < T
                    if T < T0
                        deltaTe = (1-eT0)/2*(cos(aM*(T-Mf))+1);

```

```

        end
        end
        eT(i) = eT0-eT0*(es(i)-es0)/(1-es0)+deltaTe;
        e(i) = es(i)+eT(i);
        cte1 = es(i);
        cte2 = eT(i);
        cte3 = e(i);
    end
end
if sigma(i) >= sigmaf
    es(i) = cte1;
    eT(i) = cte2;
    e(i) = cte3;
end
end
D = Da+e(i)*(Dm-Da);
omega = -El*D;
E(i) = 1/D*(sigma(i)-sigma0 +D0*E0-omega*es(i)+omega0*es0-theta*(T-
T0));

end

E0 = E(600);
E(1) = E0;
Lslim(1) = (- (Lf^2)*(-2*E0+E0.^2))/(2*b);
f_ns(1) = sqrt(3*a*((Lcabo+Lslim(1))-a)/8);
f(1)=sqrt(3*a*((Lcabo+Lslim(1))-a)/8);
e0 = e(600);
e(1) = e0;
es0 = es(600);
es(1) = es0;
eT0 = eT(600);
eT(1) = eT0;
if es(1) >= 0.9995
    es(1) = 1;
    e(1) = 1;
end
D0 = Da+e0*(Dm-Da);
omega0 = -El*D0;
sigma0 = sigmamax;
tempo(1) = 0;

% Aplicação da subida da temperatura rampa

for i = 1:600
    tempo(i+1) = 0.1*i;
    T(i+1) = (Tmax-25)/60*tempo(i+1) + T0;
    if sigmamax >= Ca*(T(i+1)-As)
        es(i+1) = es(i);
        eT(i+1) = eT(i);
        e(i+1) = e(i);
    end
    if T(i+1) > As
        if Ca*(T(i+1)-Af) < sigmamax
            if sigmamax < Ca*(T(i+1)-As)
                e(i+1) = e0/2*(cos(aA*(T(i+1)-As-sigmamax/Ca))+1);
                es(i+1) = es0 - es0/e0*(e0-e(i+1));
                eT(i+1) = eT0-eT0/e0*(e0-e(i+1));
                D = Da+e(i+1)*(Dm-Da);
                omega = -El*D;
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
    if sigmamax < Ca*(T(i+1)-Af)
        es(i+1) = es(i);
        eT(i+1) = eT(i);
        e(i+1) = e(i);
    end
    if es(i+1) >= 0.9995
        es(i+1) = 1;
        e(i+1) = 1;
    end
    D = Da+e(i+1)*(Dm-Da);
    omega = -El*D;
    E(i+1) = 1/D*(sigmamax-sigma0 +D0*E0-omega*es(i+1)+omega0*es0-
theta*(T(i+1)-T0));
    Lslim(i+1) = (- (Lf^2)*(-2*E(i)+E(i).^2))/(2*b);
    f(i+1) = sqrt(3*a*((Lcabo+(Lcabo*alfa*(T(i+1)-T0))+Lslim(i+1))-a)/8);
    f_ns(i+1)=sqrt(3*a*((Lcabo+(Lcabo*alfa*(T(i+1)-T0))+Lslim(1))-a)/8);
    end

% Aplicação da descida da temperatura rampa

for i = 601:1200
    tempo(i+1) = i*0.1;
    T(i+1) = 1/60*((25-Tmax)*tempo(i+1)+120*Tmax-1500);
% Casos T >= Ms

    if T(i+1) >= Ms
        if sigmamax <= sigmas+Cm*(T(i+1)-Ms)
            es(i+1) = es(i);
            eT(i+1) = eT(i);
            e(i+1) = e(i);
        end
        if sigmas+Cm*(T(i+1)-Ms) < sigmamax
            if sigmamax < sigmaf+Cm*(T(i+1)-Ms)
                es(i+1) = (1-es(601))/2*cos(pi/(sigmas-sigmaf))*(sigmamax-
sigmaf-Cm*(T(i+1)-Ms)))+(1+es(601))/2;
                eT(i+1) = eT0-eT0*(es(i+1)-es0)/(1-es0);
                e(i+1) = es(i+1)+eT(i+1);
            end
        end
        if sigmamax >= sigmaf+Cm*(T(i+1)-Ms)
            es(i+1) = es(i);
            eT(i+1) = eT(i);
            e(i+1) = e(i);
        end
    end
end

% Casos T < Ms

    if T(i+1) < Ms

        if sigmamax <= sigmas
            es(i+1) = es(i);
            eT(i+1) = eT(i);
            e(i+1) = e(i);
        end
        if sigmas < sigmamax
            if sigmamax< sigmaf
                es(i+1) = (1-es0)/2*cos(pi*(sigmamax-sigmaf)/(sigmas-
sigmaf)))+(1+es0)/2;
            end
        end
    end
end

```

```

        if Mf < T(i+1)
            if T(i+1) < Ms
                if T(i+1) < T0
                    deltaTe = (1-eT0)/2*(cos(aM*(T(i+1)-Mf))+1);
                end
            end
        end
        eT(i+1) = eT0-eT0*(es(i+1)-es0)/(1-es0)+deltaTe;
        e(i+1) = es(i+1)+eT(i+1);
    end
end
if sigmamax >= sigmaf
    es(i+1) = es(i);
    eT(i+1) = eT(i);
    e(i+1) = e(i);
end
end
if es(i+1) >= 0.9995
    es(i+1) = 1;
    e(i+1) = 1;
end
D = Da+e(i+1)*(Dm-Da);
omega = -El*D;
E(i+1) = 1/D*(sigmamax-sigma0 + D0*E0-omega*es(i+1)+omega0*es0-
theta*(T(i+1)-T0));
Lslim(i+1) = (- (Lf^2)*(-2*E(i)+E(i).^2))/(2*b);
f(i+1) = sqrt(3*a*((Lcabo+(Lcabo*alfa*(T(i+1)-T0))+Lslim(i+1))-a)/8);
f_ns(i+1)=sqrt(3*a*((Lcabo+(Lcabo*alfa*(T(i+1)-T0))+Lslim(1))-a)/8);

end

% LT = Lcabo+(Lcabo*alfa*(Tf-T0));

%display (E);

display (Lslim);

figure(1)
plot(tempo,T)
axis([0 120 20 90])
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Temperatura (oC)')
title('Curva Temperatura - Tempo')
%gtext('400 MPa')

figure(2)
plot (T(1:601),E(1:601),'r')
hold on
plot (T(602:1201),E(602:1201),'-b')
axis([0 90 0 0.1])
xlabel('Temperatura (oC)')
ylabel('Deformação ')
title('Curva Deformação - Temperatura')

figure (3)
plot (E(1:601),Lslim(1:601),'r')
hold on
plot (E(602:1201),Lslim(602:1201),'b')
xlabel('Deformação')
ylabel('Variação de Comprimento Efetivo do SLIM [m]')

```

```

title('Curva Variação de Comprimento Efetivo do SLIM - Deformação')

figure (4)
plot (Lslim(1:601),f(1:601),'r')
hold on
plot (Lslim(602:1201),f(602:1201),'b')
xlabel('Variação do Comprimento Efetivo do SLIM [m]')
ylabel('Variação da Flecha [m]')
title('Curva Variação da Flecha - Variação do Comprimento Efetivo do SLIM')

figure (5)
plot (T(1:601),f(1:601),'r')
hold on
plot (T(602:1201),f(602:1201),'b')
hold on
plot(T,f_ns,'--k')
xlabel('Temperatura [oC]')
ylabel('Flecha [m]')
title('Curva Variação da Flecha - Variação de Temperatura')

```


ANEXO II: Implementação das equações utilizadas no estudo de caso

```
a = 400; % Comprimento do vão (metros)
C = 1800; % Parâmetro de catenária (metros)
alfa = 18.43*10^-6; % Coeficiente de expansão térmica linear (1/C)
Tlim = 50; % Temperatura limite para que a norma nao seja violada (C)
T0 = 15; % Temperatura inicial do condutor (C)
Tsup = 70; % Temperatura superior (C)

f = (a^2)/(8*C); % cálculo de flecha
L = a+(8*(f^2))/(3*a); % cálculo de comprimento
Llim = L+(L*alfa*(Tlim-T0)); % comprimento limite
flim = sqrt((3*a)*(Llim-a)/8); %flecha limite
Lsup = L+(L*alfa*(Tsup-T0)); % comprimento a 70C
fsup = sqrt((3*a)*(Lsup-a)/8); % fleche a 70C
fviol1 = fsup-flim; % violação da flecha
Lslim = Lsup-0.2; % novo comprimento com a atuacao do SLiM
fslim = sqrt(3*a*(Lslim-a)/8); % nova fleche com a atuacao do SLiM
fviol2 = fslim-flim; % diferenca entre a nova flecha e a flecha limite

display(f);
display(L);
display(Llim);
display(flim);
display(Lsup);
display(fsup);
display(fviol1);
display(Lslim);
display(fslim);
display(fviol2);
```